

جامعة تشرين
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة القوى الميكانيكية
ماجستير طاقة شمسية

تحسين كفاءة التحويل الطاقي الشمسي/الكهربائي لمنظومة فوتوفلطائية

دراسة أُعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة القوى الميكانيكية اختصاص طاقة شمسية

إعداد الطالبة المهندسة

إسراء أنس ليلى

إشراف

المشرف الرئيسي

د.م لانا كنجو

مدرّسة في قسم هندسة القوى الميكانيكية
جامعة تشرين

المشارك بالإشراف

أ. د. فؤاد الصالح

أستاذ في كلية العلوم/ قسم الكيمياء
جامعة تشرين

للعام الدراسي 2010–2011

الفهرس

الشعور بالمشكلة :

إنّ الأزمات الطاقية العالمية في السنوات الأخيرة، و مشكلة تلوث البيئة، أعطت شعوراً ملحّاً بأهمية البحث الجدي في الطاقات البديلة و المتجددة. وبخاصةً استغلال الطاقة الشمسية في إنتاج الطاقة الكهربائيّة. والبحث في محاولة تحسين مردود التحويل الشمسي الكهربائي قدر الإمكان.

أهداف البحث:

زيادة استطاعة ومردود منظومة فوتوفولتية وذلك عن طريق تبريدها، مع إمكانية الاستفادة من الحرارة المسحوبة من الخلية في تطبيقات أخرى.

فرضيات البحث:

إنّ استخدام نظام الطاقة الشمسيّة يقلل من استهلاك الوقود، ومن ثمّ يقلل من تلوث البيئة، كما أنّ استخدام نظام الطاقة الشمسيّة ذو جدوى اقتصاديّة أكبر من استخدام كمية الوقود المكافئة لإنتاج نفس المقدار من الطاقة على المدى البعيد.

ومنه إذا استطعنا زيادة كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائيّة لنفس مساحة سطح الخلايا، فهذا يعني كسب سطوح جديدة (مقترحة) للخلية دون كلفة.

الحدود الزمانية و المكانية :

الحدود الزمانيّة: فترة دراسة رسالة الماجستير(بين أيلول 2009– أيلول 2011).

الحدود المكانيّة: سطح جامعة كلية الهندسة الميكانيكيّة والكهربائيّة و سطح منزلي، وكلاهما في محافظة اللاذقية.

منهجية البحث:

منهجيّة وصفيّة تجريبيّة.

ملخص البحث

درسنا قي هذا البحث تحسين كفاءة التحويل الفوتوقولتي لمنظومة فوتوفولتية متـــوفرة. حيـــث تُحوّل هذه المنظومات الطاقة الشمسيّة إلى طاقة كهربائية مباشرةً.

استخدمنا في سبيل هذا التحسين التبريد بواسطة تيار من الماء يُلامـــس اللـــوح الفوتوفـــولتي ويدور في دورة مغلقة بوساطة مضخة صغيرة. حصلنا على زيادة في المـــردود الكهربـــائي وكذلك حصلنا على كمية من الحرارة على شكل ماء ساخن .أدى ذلك إلـــى زيـــادة المـــردود الكلي لهذه المنظومة ، كما تمّ استخدام التبريد الهوائي إلى جانـــب التبريـــد المـــائي بوســـاطة مروحة هوائية. وفي جميع الحالات تمّ الحصول علـــى زيـــادة هامـــة فـــي كفـــاءة لتحويـــل الفوتوفولتي المذكور.

الكلمات المفتاح:

الطاقة الشمسيّة، التحويل الفوتوفولتي، مردود التحويل الشمسي/ الكهربائي.

المقدمة

تشكّل الطاقة مشكلة اقتصادية وإستراتيجية لجميع دول العالم المستوردة للنفط، إلا أنّ هذه المشكلة تُشكل بُعداً أكثر جديّة عند الدول النامية وذلك بسبب اعتمادها الكلي على الطاقة المستوردة. إضافةً إلى أنّ الطاقة المستمدة من المصادر الأحفورية أو المفاعلات النووية تكون مصحوبة بتلوث كبير للبيئة، تعود انعكاساته السلبية على كلّ الكائنات الحية مما يزيد في تدهور الظروف الصحيّة والبيئيّة، ورفع مستوى ظاهرة الاحتباس الحراري، وزيادة التصحر الذي يهدد الغطاء النباتي ويهدد الثروة الحيوانيّة ومصادر الغذاء في العالم، وذلك بالإضافة إلى عمر المصادر الأحفوريّة المحدود والذي تنبؤنا الدراسات بأنه سينتهي في النصف الثاني من القرن الحالي .

وقد تنبّه العالم إلى خطر التلوث الذي يهدد البشريّة كلها، فبدأت الجهود منذ أكثر من ربع قرن بإجراء الأبحاث والتجارب لإيجاد مصادر بديلة للطاقة التقليديّة تتميز بالتجدد والاستمراريّة وعدم التلويث للبيئة. يمكن أن نذكر من هذه الطاقات ما يأتي: الطاقة الهيدروليكية (طاقة تساقط المياه الطبيعية أو الاصطناعية، طاقة الأمواج، طاقة المد والجزر، طاقة التدرج الحراري لمياه المحيطات) وطاقة الكتل الحيوية، بإضافة إلى طاقة الرياح والطاقة الشمسيّة والطاقة الجيوحراريّة وطاقة الهيدروجين. لكنّ التركيز في هذه البحوث كان على الطاقة الشمسيّة وتقنيات استثمارها نظراً لوفرتها وعدم كلفتها الكبيرة مقارنة بالأنواع الأخرى من الطاقات البديلة.

بناءً على ما تقدم، ومنذ نشوب الأزمة النفطيّة عام 1973، اتجهت العديد من الدول العربيّة إلى استثمار بعض مصادر الطاقات المتجددة كالطاقة الشمسيّة وطاقة الرياح. فقد بدأت أنظمة الاستثمار لهذين النوعين من الطاقات المتجددة في الانتشار تدريجياً حتى وصلت إلى المرحلة التجارية وأصبحت الكثير من الدول تعتمد على هذه الأنظمة في توفير جزء لا يُستهان به من احتياجاتها الطاقيّة (الكهربائيّة، الحراريّة والميكانيكيّة).

تُعدُّ الطاقة الشمسيّة من الطاقات التي ستشكّل، بدون أدنى شك، عصب حياتنا المستقبليّة. فحالياً بدأنا نلتمس فوائدها ولكن السنين المقبلة بما ستحمله من تطورات ستغني حصيلتنا في فهم هذه الطاقة، بالإضافة إلى تحسين استفادتنا منها وإيجاد الصيغ التي تمكّن من استغلالها بأقل كلفة. فالطاقة الشمسيّة هي الشكل الأصيل للطاقة التي نشأت منها الحياة وواصلت تقدمها على الأرض، وإنّ استخدام أي قدر منها لا يشكل خطورة على أي نوع من أنواع الكائنات الحية، لذلك لا بدّ من استخدام الطاقة الشمسيّة في المناطق المشمسة من العالم، ولاسيما في قطرنا الذي يُعد من البلدان التي تتميز بشدة الإشعاع الشمسي وتتراوح قيمه الوسطية ضمن المجال (1820–2300 kWh/m².year) [1]. لكن على الرغم من هذا الثراء الواضح لسوريا بالطاقة الشمسيّة (تسطع الشمس في سوريا بمعدل 300 يوم/السنة) إلا أنّها تفتقر للمشاريع المستفيدة

من هذه الطاقة لتوليد الطاقة الكهربائيّة، باستثناء الاتفاق الذي تمّ مؤخراً مع شركة مان الفرنسيذة، من أجل إعداد الدراسات النهائيّة والفنيّة لإقامة محطة توليد كهربائيّة تعمل بالطاقة الشمسيّة في سوريا، وكذلك الاتفاقية المبرمة بين الشركة السورية والأوكرانية لإنتاج الخلايا الكهرضوئية خلال العام الماضي (2010).

يمكن تحويل الطاقة الشمسية إلى أشكال أخرى من الطاقة كالطاقة الحرارية والتي لها تطبيقات متعددة في مجالات مختلفة (تسخين الماء، تدفئة المباني، تسخين أحواض السباحة، تنقية المياه المالحة، التبريد، التجفيف، البرك الشمسية، الطهي،....الخ).

أما الشكل الآخر من الطاقات الذي يمكن تحويل الطاقة الشمسية إليه فهو الطاقة الكهربائية، حيث يمكن التحويل وفق آليتين: الأولى ترموديناميكيّة تعتمد على التحويل الحراري أولاً للطاقة الشمسية في نظام ترموديناميكي (محطة كهربائية شمسيّة تحوي على مجموعة العنفة ومتمماتها) للحصول على وسيط التشغيل الذي سيستخدم في الحصول على الطاقة الميكانيكية عن طريق تدوير العنفة والتي ستقوم بتدوير منوّبة مربوطة على محورها، وهذا بدوره سوف يؤدي إلى توليد الطاقة الكهربائية. أما الآلية الثانية للحصول على الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية فهي الطريقة المباشرة التي تعتمد على التحويل الفوتوفولتي باستخدام الخلايا الفوتوفولتية التي تصنّع بشكل اعتيادي من مواد نصف ناقلة يتم إشابتها بنوعين من العناصر للحصول على أنصاف نواقل من النوعين (N) و (P)، حيث يتم الاستفادة من طاقة الفوتونات الضوئيّة لتحرير الالكترونات والتي يتم إمرارها في دارة خارجية للحصول على التيار الكهربائي [2].

لقد تم التركيز في هذا البحث على هذا النوع من التحويل (التحويل الفوتوفولتي)، ومحاولة رفع كفاءة الخلايا الفوتوفولتية وذلك عن طريق خفض درجة حرارة سطح الخلية. يتم ذلك بالتخلص من الحرارة المؤدية إلى تسخين الخلية، حيث تتميز الخلايا الفوتوفولتية بتابعية مردود التحويل الفوتوفولتي لدرجة حرارة الخلية نفسها. فعندما تتواجد الخلية في ضوء الشمس لزمن طويل فإنها تسخن نتيجة امتصاص جزء من طاقة السيالة الضوئية بشكل حراري في مادة نصف الناقل، ومن ثمّ تتناقص استطاعتها. كما نسعى في هذا البحث إلى إمكانية استخدام الحرارة المسحوبة في مجالات أخرى كتسخين الماء.

يتضمن البحث أربعة فصول هامة وهي على التوالي:

الفصل الأول: يتطرّق إلى مفهوم الطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي وحساباته

الفصل الثاني: يتضمن مفهوم التحويل الفوتوفولتي للطاقة الشمسية، وذلك من خلال التعرّف على مفهوم أنصاف النواقل ومبدأ عمل الخلية الفوتوفولتية وأنواع الخلايا.

الفصل الثالث: يتناول الدراسة المرجعية للأبحاث التي أُجريت عبر العالم لتحسين مردود الخلايا الكهروشمسية والتوصل خلال ذلك إلى فكرة هذا البحث بتخفيض درجة حرارة سطح الخلية لرفع مردود الخلية من جهة، واستخدام الحرارة المسحوبة في بعض التطبيقات من جهة أخرى.

الفصل الرابع: يتعرّض إلى الدراسة التجريبية التي تم إجراءها لتحسين مردود الخلايا الفوتوفولتية، وذلك من خلال توصيف التجهيزات المستخدمة، وتوصيف التجارب ومخطط العمل ونتائج التجارب.

كما يتضمن البحث ملحقاً يشمل جداول حسابات شدة الإشعاع الشمسي لأيام التجارب، إضافةً إلى نتائج البحث وبعض التوصيات والمُقترحات التي بإمكانها تطوير البحث في هذا المجال في المستقبل، فالظروف المادية المتواضعة لهذا البحث حالت دون تحقيق الكثير من الأمور التي كان بإمكانها دفع البحث بخطوات أكثر تقدماً.

الفصل الأول

الطاقـــــة الشمســـيّة والإشعاع الشمسي

1-1 الشمس:

تُعد الشمس نجم مجموعتنا الشمسية، فهي واحدة من عدد لا يُحصى من النجوم في درب التبانة، وهي عبارة عن كرة ضخمة مؤلفة بشكل أساس من الهيدروجين والهليوم.

تشير نظرية تشكّل الشمس إلى أنّها قد نشأت من سحابة غازية مؤلفة من غاز الهيدروجين ثم مرّت بعدة مراحل حتى تشكّلت، حيث شهدت المرحلة الأولى تجاذباً كتلوياً لجزيئات الهيدروجين والتي سببت حدوث تصادمات عنيفة بين هذه الجزيئات نتج عنها حرارة هائلة أدّت إلى اتحاد نوى الهيدروجين مع بعضها لتشكيل الهليوم. بما أن الكتلة الذريّة لذرات الهليوم أقل من الكتلة الذريّة لذرات الهيدروجين فهذا يعني حسب نظرية أنشتاين إلى تحول الكتلة المفقودة إلى طاقة في أثناء عملية الانصهار.$H+H \rightarrow He+Q$ الأمر الذي أدى إلى ولادة الشمس، و مما يرجح وجهة النظر هذه كون الشمس مؤلفة بشكل أساس من 80% هيدروجين، و19% هيليوم، أما الجزء المتبقي فهو يتكون من عناصر أخرى.

تنتج طاقة الشمس في نواة الشمس بوساطة تفاعلات نوويّة تتمثل باندماج نوى الهيدروجين لتشكيل الإشعاع ألفا (نواة الهليوم) حيث تصل درجة الحرارة إلى $15 \times 10^6 K$ ويكون الضغط هائلاً، بينما تكون درجة حرارة السطح الوسطيّة بحدود 5570 K [3]، وتكون كتلة الإشعاع ألفا أقل من كتلة بروتونين، الأمر الذي يحوّل هذا الفرق في الكتلة إلى طاقة على شكل حرارة وضوء تنتشر في أرجاء الكون كافةً.

1-1-1 تركيب الشمس:

تتكون الشمس من الطبقات الآتية:

1-1-1-1 النواة المركزية والمنطقة الإشعاعية: تشكّل النواة حوالي 15% من الشمس، أما درجة حرارتها فتتراوح بين 15مليون كلفن في المركز و7 مليون كلفن في أقرب نقطة من النواة، وفيها تتم التفاعلات النووية حيث يتحول الهيدروجين إلى هليوم بشكل أساس. تأتي بعد النواة منطقة إشعاعية كثيفة جداً تمر خلالها الطاقة الناتجة عن التفاعلات النووية باتجاه السطح على شكل فوتونات ضوئيّة منبعثة، أما درجة حرارة السطح الخارجي لهذه الطبقة فتنخفض إلى 2 مليون كلفن. أما المنطقة التي تليها فهي منطقة حمل حراري، حيث تساعد تيارات الحمل الحراري ذات السعات الكبيرة ضمن هذه المنطقة على انتقال الطاقة بفاعلية أكبر نحو السطح، وتكون ظاهرة الحمل الحراري مرتبطة مع الدوران الذي يؤدي إلى تشكل حقل مغناطيسي يتجلى بمظاهر النشاط الشمسي (البقع الشمسية، المقذوفات الشمسية،...الخ)[4]

1-1-1-2 الفوتوسفير: تطلق هذه التسمية على السطح المرئي للشمس، فالغازات الحارّة القادمة من النواة تصل إلى السطح لتشكل تركيبة حبيبيّة على هذه الطبقة. كما يمكن رؤية بقع داكنة سببها الحقل المغناطيسي الداخلي.

1-1-1-3 الكروموسفير: تقع هذه الطبقة فوق منطقة الفوتوسفير وتمتد إلى ارتفاع 10000km، أما درجة حرارتها فتتراوح بين 10000°C (فوق طبقة الفوتوسفير) وفوق 20000°C ضمن الطبقات الأكثر ارتفاعاً.

1-1-1-4 التاج الشمسي Corona Layer: هو وسط غازي نادر ذو درجة حرارة عالية لكن على الرغم من ندرة الغاز فإنّ التصادم مابين الجزيئات المتحركة بسرعة كبيرة يعمل على تأين ذراتها، حيث أنّ هذه الذرات المتأينة (مثل الإلكترونات والبروتونات) تتحرك حول خط الحقل المغناطيسي.

1- 2 الطّاقة الشمسيّة:

1-2-1 تاريخ استخدام الطاقة الشمسيّة:

كانت الشمس ومازالت المصدر الرئيس المُطلق وأساس الحياة على كوكبنا، فقد عرفها الإنسان وعبدها واستخدمها بطريقته الفطرية البدائية وأوجد لها استخدامات واسعة الانتشار لوجودها في كل مكان. فالكلدانيون هم أول من استخدم الطاقة الشمسية، حيث أشعلوا القناديل في المعابد عن طريق عكس الإشعاع الشمسي بوساطة أوعية ذهبية عام (714 ق.م)، وفي عام (212 ق.م) استخدم العالم أرخميدس المرايا لتركيز الأشعة الشمسيّة بغية حرق الأسطول الروماني، ومنذ ذلك الوقت وحتى القرن السابع عشر الميلادي لم تلقَ استخدامات الطاقة الشمسية تطوراً يُذكر.

شهدت الفترة الزمنية اللاحقة تطورات أكثر أهميّة في استخدام الطاقة الشمسيّة، فقد قام العالم الفلكي يوغس كاسين عام (1747 م) بصنع مرآة بقطر 1120 ملم لتركيز الأشعة في نقطة محرقيّة وتوصل من خلال ذلك إلى درجة حرارة حوالي 1000°C تكفي لصهر الحديد في بضع ثوان. كما قام العالم الكيميائي الفرنسي لافوازييه في عام 1784م بصنع فرن على مبدأ العدسات المركّزة للإشعاع الشمسي وتمّ الحصول من هذا الفرن على درجة حرارة حوالي 1760°C كافية لصهر البلاتين. أما العالم سترلينغ فقد قام بصنع آلة شمسيّة في عام(1816م) مازال يُعتمد على مبدئها في الحركة حتى الآن.

كما شهد عام 1872م لأول مرة في صحراء تشيلي استخدام محطة لتقطير المياه باستخدام الطاقة الشمسية باستطاعة مقدارها 2300 لتر/يوم للحصول على مياه للشرب، وتمّ استخدام تلك المحطة لمدة 30 سنة.

في حين قام العالم الفرنسي آبيل في عام (1875م) بصنع مطبعة تعمل على مبدأ استخدام الطاقة الشمسيّة. وفي عام 1904م قام العالمان (بويل– رايمان) من ولاية كاليفورنيا بصنع آلة شمسيّة باستطاعة 15kW لتحريك مضخات مائيّة تُستخدم لري الأرض. كما صنع العلماء (فرانك– شومان– بويل– رايمان) في عام 1910م آلة لنفس الغرض السابق باستطاعة تتراوح (37-45 kW).

شهدت فترة الحربين العالميتين الأولى والثانية ركود في تطوير استخدام الطاقة الشمسية واستمر ذلك حتى النصف الثاني من القرن العشرين حيث بدأت كل من الولايات المتحدة الأمريكيّة والاتحاد السوفيتي والهند بالتركيز على تطوير البحث العلمي الذي يتناول تطبيقات الطاقة الشمسيّة في الحياة العملية. ففي عام (1954م) أعلنت شركة بيل عن إنتاجها للخلايا الشمسية المصنوعة من السيلكون التي تحول الطاقة الشمسيّة مباشرة إلى كهربائية، وفي عام (1958م) أعلن الاتحاد السوفييتي عن إطلاق أول قمر صناعي يستخدم الطاقة الشمسيّة للتزود بالطاقة الكهربائيّة.

بعدها وفي عام(1962م)عقدت منظمة اليونسكو مؤتمر عالمي في روما لمعالجة مسائل الطاقة الشمسية حضره أكثر من 500 عالم من 50 دولة، وقد تناول المؤتمر خاصةً تطبيقات الطاقة الشمسية في الدول النامية. ثم قامت شركة (luz) بين عامي(1988- 1984م) بتركيب محطات شمسية حرارية متعددة ذات قدرة توليد إجمالية مقبولة تبلغ (275 MW) وذلك في صحراء موجاف في كالفورنيا.

أخذت السنوات الأخيرة تشهد اهتماماً كبيراً بموضوع حماية البيئة وذلك لأنّ الطاقة الحرارية المتولدة من مصادر الطاقة التقليدية تلعب دوراً هاماً في تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري. لذلك يجب أن تكون مصادر الطاقات الجديدة البديلة للأنواع التقليدية، والتي ستؤمن حاجة البشرية من الطاقة في المستقبل، نظيفة وذات استطاعة كافية. فالطاقة الشمسية هي أحد المصادر الهامة و العظيمة للطاقة والتي يمكن أن تقابل احتياجات العالم بأقل تلوث بيئي ممكن ومن ثمَ تُعد المنبع الأول للطاقة في صفوف مصادر الطاقة البديلة.

2-2-1 ميزات استخدام الطاقة الشمسية:

تتميز الطاقة الشمسية بمزايا متعددة يمكن إجمالها بما يأتي:

1) طاقة هائلة من حيث مخزونها وكميتها. فمن حيث المخزون تُعدّ الشمس منبع لا ينتهي من الطاقة، أما من حيث الكمية فالشمس ترسل سنوياً إلى سطح الأرض ما مقداره 3.9×10^{24} J أي ما يعادل 1.08×10^{18} [kWh]، وهذا يعادل 10000 مرة من الاستهلاك الأولي للطاقة في العالم ويفوق كل احتياطيات الطّاقة المتاحة.
2) طاقة مجانية، حيث يعتمد استخدامها على الكلفة التأسيسيّة فقط.
3) تتوزع على سطح الكرة الأرضيّة، وتصل إلى الجميع فلا حاجة لنقلها و توزيعها.
4) توزعها المنتظم تقريباً حسب خطوط العرض، على الرغم من الفرق في توزعها بين خط الاستواء والقطبين، ويعتمد ذلك على المنطقة الجغرافية مما يسهل عملية دراستها واستخدامها وتبادل المعلومات والدراسات حولها.
5) عمليّة من ناحية استخدامها، فهي قابلة للتحول إلى أنواع أخرى من الطاقة كالطاقة الحراريّة والميكانيكيّة والكهربائيّة.
6) إمكانية استعمالها في بعض الاستخدامات الخاصة والتي تتعلق بحياة الإنسان والنبات مثل (المشاريع الضخمة التي تعتمد على تبخير كميات هائلة من المياه وعمليات التركيب الضوئي وغيرها).

7) تُعد مصدرً نظيفًا للطاقة من حيث تأثيرها على البيئة وعدم خطورتها في الاستخدام.

كما أنّ للطاقة الشمسية ايجابيات، فإن لها أيضاً بعض المثالب يمكن إجمالها بما يأتي:

a. توزعها على مساحات كبيرة لتصبح كثافتها قليلة بالنسبة لواحدة السطح.
b. عدم استمراريتها خلال اليوم، حيث تتوفر فقط لساعات معينة في اليوم مما يسبب مشاكل عمليّة في استخدامها و ضرورة تخزينها.
c. جهل المستهلك بأهميتها، مما يتطلب وضع خطة توجيه بما يتناسب مع التحولات الاجتماعية التي ترافق استخدام هذه الطاقة.
d. إنّ نظام الطاقة الذي عاشه الإنسان خلال التطور الصناعي نتج عنه نظام حياتي معين، ونظام الطاقة الشمسية الجديد قد يتطلب تغيرًا نوعيًا في بعض أسس هذا النظام.

3-2-1 تطبيقات الطاقة الشمسية:

تتميز الطاقة الشمسية بإمكانية استخدامها في تطبيقات متعددة يُمكن تصنيفها إلى:

1-3-2-1 تطبيقات حرارية:

تشمل جميع التطبيقات التي تعتمد على إنتاج الحرارة باستخدام الطاقة الشمسيّة والتي نميّز منها ما يأتي:

أ- تسخين المياه للاحتياجات المنزلية والإنتاجية: يُعد هذا التطبيق من أكثر التطبيقات الحرارية استخداماً. يقدّم سخان الماء الشمسي فائدتين أساسيتين تتمثّل الأولى بتقليل الحاجة إلى مصدر الطاقة المساعدة (حرّاق يعمل على الغاز أو الفيول أو مقاومة كهربائية) لتسخين الماء، والفائدة الأخرى هي تخفيض التلوث البيئي.

ب- تدفئة المباني السكنيّة و الصناعيّة: يوجد نوعان أساسيان للتدفئة الشمسيّة هما التدفئة الفعّالة والتدفئة السلبية. ففي التدفئة الفعّالة تُستخدم أداة دفع للوسيط الحراري المستخدم (مضخة في حال الماء، ومروحة في حال الهواء)، ويتألف نظام التدفئة في هذه الحالة من لواقط شمسيّة حراريّة، الخزان الحراري، مصدر طاقة مساعدة، مجموعة القيادة والتحكم، والتوصيلات. أما التدفئة السلبيّة فتتميز بعدم وجود مراوح أو مضخات، ويتم انتقال الحرارة في هذه الحالة بالحمل الحراري الطبيعي والإشعاع والتوصيل، ويكون نظام التدفئة في هذه الحالة جزءاً من المبنى المُراد تدفئته.

ت- التكييف والتهوية: يوجد نوعان من التكييف الشمسي هما التكييف الشمسي بالتجفيف والتبخير و التكييف الشمسي بآلة تبريد امتصاصيّة.

ث- تجفيف المنتجات الزراعيّة والصناعيّة: تستخدم فيه الطاقة الشمسيّة لتخليص المواد المراد تخزينها لفترة طويلة من السوائل التي تحتويها بنسب معينة بهدف حمايتها من التلف. يتضمن التجفيف الشمسي ثلاثة أنواع هي: التجفيف عن طريق التعرض المباشر لأشعة الشمس، و التجفيف عن طريق التعرض إلى الإشعاعات الشمسيّة عبر الزجاج، والتجفيف في الظل ضمن تيار هوائي ساخن ذي درجة حرارة أقل من 50^oC.

ج- تقطير مياه البحر والمياه المعدنية ومعالجة المياه المالحة.

ح- تخمير ومعالجة الفضلات العضوية لإنتاج الغازات الصناعية.

خ- الإرجاع الكيميائي للمواد العضوية.

د- التسخين الشمسي للمسابح.

ذ- البرك الشمسية.

ر- الطهي الشمسي.

1-2-3-2 تطبيقات كهربائية:

تشمل جميع التطبيقات التي تعتمد على إنتاج الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسيّة، حيث يوجد نوعان من أنظمة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية هما:

A. **أنظمة التحويل المباشر:** تتم باستخدام الخلايا الشمسيّة والتي تتألف بشكل أساس من مواد نصف ناقلة تستطيع تحويل طاقة الفوتونات الضوئية إلى طاقة كهربائية. تولّد الخلايا الشمسية تيار كهربائي مستمر ومباشر (كما في البطاريات العادية والسائلة)، تعتمد شدته على سطوع ومستوى أشعة الشمس وكفاءة الخلية نفسها و مساحة سطح الخلية الواحدة وعدد الخلايا.

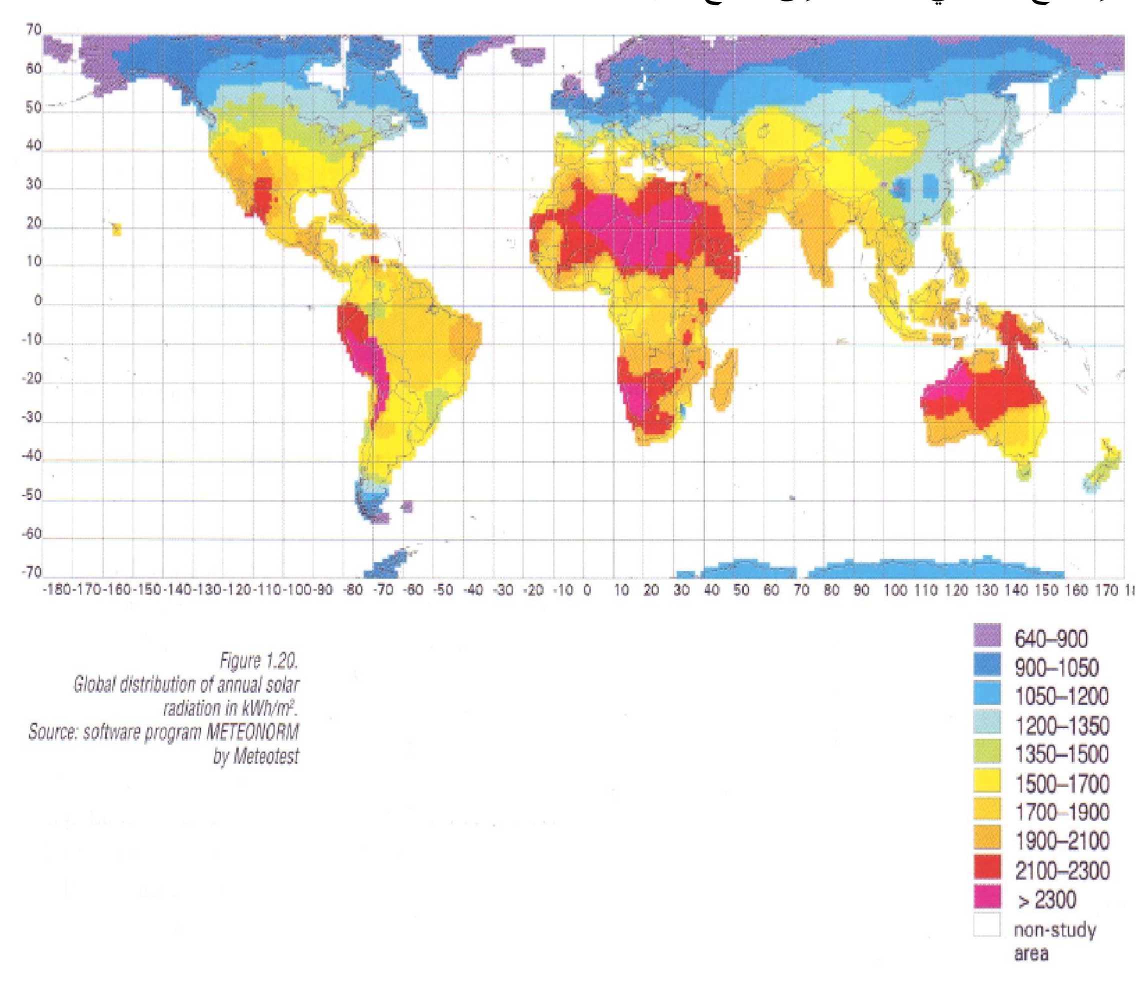
B. **أنظمة التحويل غير المباشر:** تعتمد على أنظمة ترموديناميكية يتم فيها استخدام الطاقة الشمسية للحصول على الطاقة الحرارية التي تعمل على تبخير وسيط التشغيل لهذه الأنظمة، وساطة جريان هذا الوسيط عبر العنفة يتم الحصول على طاقة ميكانيكية، تتحوّل عند محور العنفة بوساطة مولّد إلى طاقة كهربائية. يتم ذلك في محطات توليد الطاقة الكهربائية الشمسية، والتي يمكن أن تكون إما محطات غازية أو بخارية أو محطات مركبة (بخارية-غازية) مدمجة مع نظام الطاقة الشمسية أو تكون فقط محطات شمسية.

1-2-4 الطاقة الشمسية في البلاد العربية:

إن موقع الوطن العربي الجغرافي يؤهله إلى أن يكون السبّاق في مجال استخدام الطاقة الشمسية، وذلك لأن معدّلات الإشعاع الشمسي في الدول العربية تتمتع بمتوسط إشعاع شمسي في فصل الصيف يساوي أو يزيد عن [W/m^2] 7000 في اليوم الواحد. يظهر الشكل (1-1) التوزع الإجمالي للإشعاع الشمسي السنوي بـkwh/m^2 على سطح الكرة الأرضية، حيث يظهر ثراء الوطن العربي بالطاقة الشمسية.

يمتد الوطن العربي بين خط طول [17°] غرب غرينتش في أقصى الصحراء الغربية إلى خط طول [60°] شرق غرينتش في أقصى شرق عمان، وبين شمال خط الاستواء بقليل وخط عرض [37°] شمالاً. ينعكس هذا الأمر على كمية الإشعاع الشمسي الواصل إلى الأرض في المنطقة التي يشغلها الوطن العربي، حيث أن هناك مناطق تتأثر بالرياح الموسمية خلال فصل الصيف الأمر الذي يؤدي إلى تكون الغيوم وسقوط الأمطار صيفاً، ومن ثمّ حجب أشعة الشمس خلال بعض أيام الصيف، وبالمقابل فإن هناك مناطق

صحراوية تتمتع بشمس مشرقة خلال معظم أيام العام غير أن العواصف الرملية التي تمر فيها تقلل من كميات الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض.



الشكل (1-1) التوزع الإجمالي للإشعاع الشمسي السنوي على سطح الكرة الأرضية بـــkWh/m^2 [5]

1-2-5 الطاقة الشمسية في القطر العربي السوري:

يقع القطر العربي السوري في المنطقة المعتدلة الدافئة من الإقليم المناخي للبحر الأبيض المتوسط بين خطوط عرض (°37-°32.5) شمالاً، وتُعد هذه المنطقة من المناطق الغنية بالإشعاع الشمسي على مدار العام.

يتميز قطرنا بحسب خريطة معدّل الإشعاع للكرة الأرضية، كما في الشكل (1 -1) بما يأتي:

1) أعلى معدل للإشعاع الشمسي السنوي والمقدّر بإشعاع شمسي وسطي شهري يزيد عن 21 $Kcal/cm^2$

2) درجة متدنية جداً للأيام الغائمة .

3) اختلاف واضح نسبياً في قيم الإشعاع خلال السنة أي بين فصلي الشتاء والصيف كما هو مبيّن في الجدول (1-1).

يقابل معدلات الإشعاع الشمسي العالية في القطر العربي السوري عدد ساعات إشعاع شمسي طويلة خلال العام، فالمتوسط السنوي للسطوع في سورية هو 3257 ساعة.

المدينة	$ك_2$	شباط	آذار	نيسان	أيار	حزيران	تموز	آب	أيلول	$ت_1$	$ك_2$	$ك_1$
حلب	43	67	67	70	85	95	98	98	98	90	68	48
دمشق	61	69	80	80	81	97	100	99	95	88	81	64
دير الزور	56	78	74	71	80	91	95	96	95	91	74	66
اللاذقية	53	68	71	73	84	88	87	93	91	89	73	61
القامشلي	51	70	55	69	76	90	93	95	96	89	70	57
الرقة	54	60	68	71	81	92	97	97	93	86	74	69
تدمر	59	79	77	73	85	81	98	98	94	93	74	69
حماه	47	62	68	73	85	95	98	97	94	86	75	47

الجدول (1-1) النسبة المئوية للسطوع الشمسي لبعض مدن القطر العربي السوري خلال أشهر العام [6]،[7]

1-3 الإشعاع الشمسي

1-3-1 التوزع الطيفي للإشعاع الشمسي [8]:

الأشعة الشمسية هي أشعة كهرطيسية (تتألف من أمواج حقلين كهربائي ومغناطيسي) وتنتشر في الفضاء مثل بقية الأشعة الكهرطيسية بنفس السرعة وهي سرعة الضوء (3×10^8 m/sec) و بأطوال موجية عديدة ذات طاقات مختلفة.

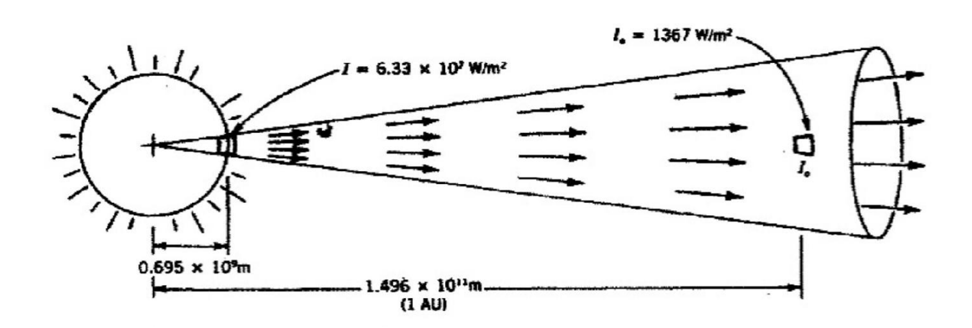
يُقسم الإشعاع الشمسي حسب الطيف الموجي إلى ثلاثة أقسام رئيسة:

1) **مجال الأشعة فوق البنفسجية:** يشكل حوالي 8% من مجموع الأشعة الشمسية ويُحجز قسم كبير منها في طبقة الأوزون ولا يصل سوى 2% من قيمتها الإجمالية في الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض. يحتوي هذا المجال على الأشعة ذات أطوال موجية أقل من 0.38μm، وهي من أنواع ثلاثة UV(C،B،A) .
2) **مجال الأشعة المرئية:** تشكّل حوالي 42% من مجموع الأشعة الشمسية، وتغطي أطوال الموجات (0.38 –0.78 μm).
3) **مجال الأشعة تحت الحمراء القريبة:** تشكّل حوالي 51% من مجموع الأشعة الشمسيّة وتتراوح طول موجاتها بين (0.78 –2.6μm) وهي أشعة غير مرئية ويطلق عليها اسم الأشعة الحراريّة.

1-3-2 مفهوم الثابت الشمسي G_{sc}:

تبلغ شدة الإشعاع الشمسي على سطح الشمس تقريباً حوالي (6.33×10^7 W/m²)، و بما أنّ الإشعاع عندما ينتقل إلى الأرض ينتشر خارجاً متناسباً عكساً مع مربع المسافة بالنسبة للزمن، (متوسط المسافة بين

الأرض والشمـــــس هو 1.496×10^{11} m)، بالتالي فإنّ الطاقة المشعّة الساقطة على واحد متر مربع من مساحة السطح تتناقص إلى حوالي 1367W كما هو مبين بالشكل (1−2) [9].

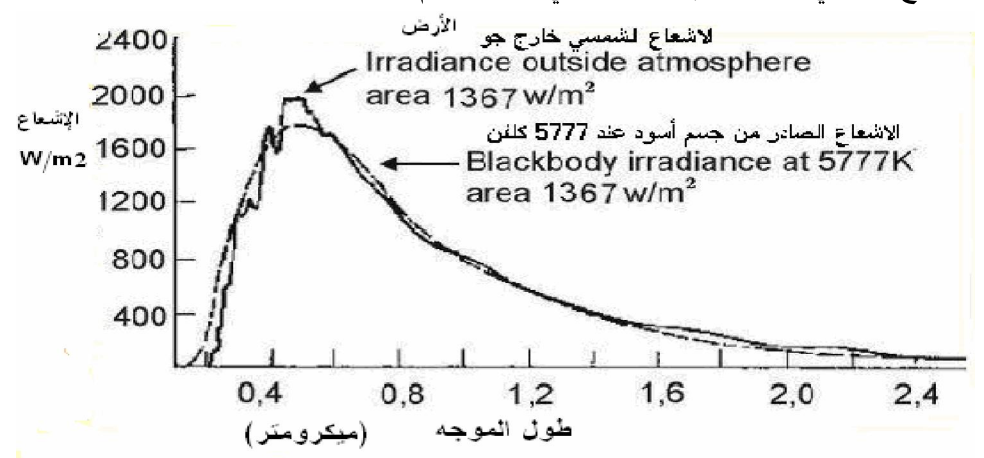


الشكل (1−2) الإشعاع الشمسي على سطح الشمس، وقيمة الثابت الشمسي

يُعرف الثابت الشمسي (Gsc) بأنه مقدار الطاقة الساقطة عمودياً على واحدة المساحة من سطح مستو خارج الغلاف الجوي الأرضي مباشرةً خلال وحدة الزمن عندما يكون متوسط المسافة بين الأرض والشمـــس هو (1.496×10^{11} m) و تبلغ قيمته 1367W/m² [9]. تُعطي بعض المراجع قيماً أخرى للثابت الشمسي منها القيمة (1353W/m²)، ولكنّ الأقمار الصناعية الحديثة أثبتت أنّ هذه القيمة منخفضة، وأنّ هناك تغيرات يومية وشهرية للإشعاع الشمسي ولكن يُعتقد أنها ليست أكثر من (±0.25%) والدراسات مستمرة لاكتشاف التأثير الكامن لهذه التغيرات على مناخنا، حيث قُدّر أن هبوط 1% فقط من خرج الشمس من الإشعاع سوف يؤدي إلى تناقص درجة الحرارة الوسطية للأرض إلى أكثر من درجة واحدة، ومن ثمّ سيتم تغطية كامل الأرض بالثلج إذا تناقص الإشعاع الشمسي بنسبة 6% فقط.

تشع الشمس كميات هائلة من الطاقة الشمسية، لكن جزءاً يسيراً منها فقط يصل إلى الغلاف الجوي وهذا الجزء يشبه توزيعه الطيفي إلى حد كبير ما يشعه جسم أسود عند درجة حرارة قدرها 5777 K.

يبين الشكل (1−3) توزيع الطاقة الشمسية على الأطياف المختلفة خارج الغلاف الجوي وعلى الأرض وكذلك يبين التوزيع الطيفي للطاقة الإشعاعية التي يبثها جسم أسود عند درجة حرارة قدرها5777K .



الشكل (1−3) الإشعاع الشمسي والإشعاع المنبعث من جسم أسود ساخن عند درجة حرارة 5777 K.

1-3-3 الإشعاع الشمسي الخارجي:[10]

بما أنّ مدار الأرض إهليلجي فالمسافة بين الأرض والشمس تتغير على مدار السنة، ومن ثمّ تتغير قيمة الإشعاع الشمسي الخارجي متناسباً عكساً مع مربع المسافة بين الأرض والشمس، ومن ثمّ يمكن أن تُعطى قيمة الإشعاع الشمسي الخارجي بالعلاقة الآتية:

$$G_0 = Gsc[1 + 0.034 COS(360N/365.25)] \qquad (1-1)$$

Gsc: الثابت الشمسي (W/m^2)

N: رقم اليوم في السنة ابتداء (من1 حتى365) من1 كانون الثاني حتى 31 كانون الأول.

1-3-4 الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض [8]:

يمر الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض أولاً عبر الغلاف الجوي للأرض، ومن ثمّ يتعرض هذا الإشعاع إلى التشتت والامتصاص الذي يحدث بسبب مكونات هذا الغلاف، حيث تكون الإشعاعات قصيرة طول الموجه عرضة للتشتت أكثر من الإشعاعات طويلة الموجه. و من ثم نتيجة للتشتت والامتصاص يكون الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض مكوّن من الأقسام الأتية:

- الإشعاع المباشر: هو الإشعاع القادم مباشرةً من الشمس.
- الإشعاع المنتشر:هو الإشعاع الصادر عن الوسط المحيط بالكرة الأرضية، بالإضافة إلى الأجسام العالقة في الغلاف الجوي. يتألف الإشعاع المبعثر من قسمين الأول متشتت بالغلاف الجوي والثاني منعكس على سطح الأرض.
- الإشعاع الكلي: هو مجموع الأشعة المباشرة والمبعثرة الواصلة إلى سطح الأرض.

1-3-5 أثر الغلاف الجوي على الإشعاع الشمسي:

يحوي الغلاف الجوي على مكوّنات عدة تؤثر على الإشعاع الشمسي الذي يجتاز هذا الغلاف، حيث يشكّل غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) 0.03% من مكوّنات هذا الغلاف، والأرغون (Ar) 0.9%، و الأوكسجين (O_2) 21% والنيتروجين (N_2) 78%. كما يوجد بعض الغازات الأخرى مثل بخار الماء حيث يكون بالقرب من السطح، بإضافة إلى طبقة الأوزون على علو 20 كم تقريباً والتي تلعب دوراً هاماً في امتصاص الأشعة فوق البنفسجية لتشكيل طبقة الأوزون في الستراتوسفير. يحتوي الغلاف الجوي أيضا على بعض المكوّنات الأخرى مثل الغبار والرذاذ والسحب من قطرات ماء أو بلورات ثلج[11].

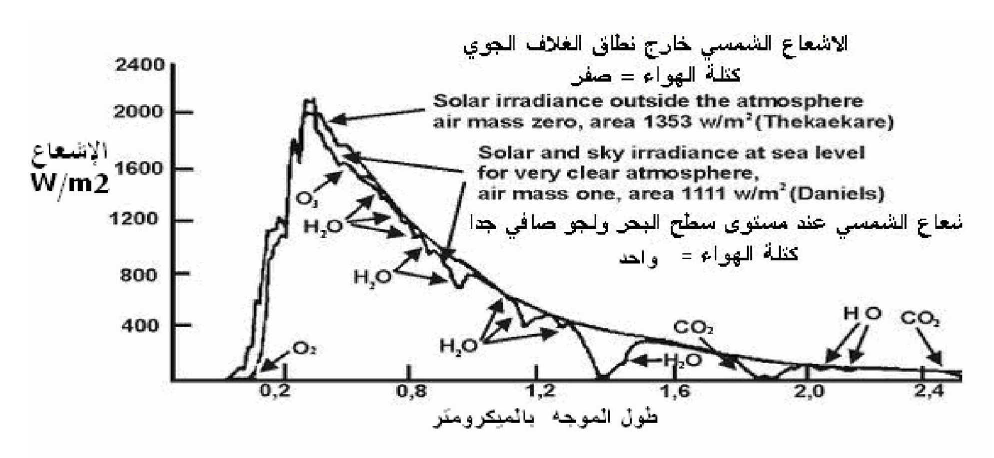
تقع أهم التغيرات التي تطرأ على الإشعاع الشمسي في الطبقة الجوية السفلية، وتقدّر سماكة طبقة الغازات التي يعبر من خلالها الإشعاع الشمسي حوالي 7.8 كم التي تشكل الجو الهوائي حول الأرض بشكل أساس.

1-3-5-1 تأثر الإشعاع الشمسي بمكونات الغلاف الجوي في حالة صفاء الجو:[12]

تتجسد المؤثرات التي يتعرض لها الإشعاع الشمسي عندما يكون الجو صافياً بما يأتي:

أ- **الامتصاص في الغلاف الجوي:**

يوجد في الغلاف الجوي عدة مكونات تمتص جزء من الإشعاع الشمسي المار عبره ومن هذه المكونات: بخار الماء وجزيئات الأكسجين وغاز الأوزون وثاني أكسيد الكربون، حيث يتم الامتصاص من قبل هذه الغازات عند أطوال أمواج معينة. يبين الشكل (1-4) تأثير كل من الأوكسجين، وبخار الماء، وثاني أكسيد الكربون وغيرها من مركبات الغلاف الجوي على الإشعاع الشمسي.



الشكل (1- 4) تأثير مكوّنات الغلاف الجوي على الإشعاع الشمسي.

ب- **التشتيت في الغلاف الجوي:**

يحوي الغلاف الجوي على العديد من الجزيئات لبعض الغازات و الغبار و قطرات من الماء وغيرها، ولكن حجم الفراغ الكائن بين هذه الجزيئات يكون أكبر بكثير من حجم الجزيئات نفسها، حيث تعمل كل جزيئة كعائق أمام سير الإشعاع الذي يمر عبر الغلاف الجوي فتغير من اتجاهه إلى اتجاه آخر وهذا ما يسمى بالتشتيت.

يمكن أن نميّز نوعين من التشتيت و هما:

1) **تشتيت ريليه**: يكون بوساطة جزيئات الهواء أو الغازات التي حجومها صغيرة جداً مقارنة مع أطوال أمواج الإشعاع.

2) **تشتيت ماي**: يكون بوساطة جزيئات أكبر من طول موجة الإشعاع مثل جزيئات الغبار.

يمكن القول إجمالاً بأن حوالي 12% من الإشعاع المتجه نحو الأرض يتشتت وحوالي نصف الإشعاع المبعثر يعود إلى الفضاء الخارجي.

عندما يحدث امتصاص للإشعاع الشمسي فانّ جزءاً من الطاقة الإشعاعية تتحول إلى طاقة حراريّة، ويتجه الجزء الآخر إلى سطح الأرض على شكل إشعاع مبعثر.

1-3-5-2 تأثر الإشعاع الشمسي بمكونات الغلاف الجوي في حالة الجو الغائم:

يواجه الإشعاع الشمسي عندما يجتاز الغلاف الجوي في طريقه إلى سطح الأرض عائقاً أخر وهو السحب التي تمتص قدراً كبيراً من الإشعاع الشمسي. يكون معظم الإشعاع الشمسي في هذه الحالة منعكساً نحو الفضاء من سطح الأرض، وجزء منه تمتصه السحب، أما الجزء المتبقي فينبعث نحو الأرض على شكل إشعاع مبعثر.

تكون غالبية أنواع السحب ذات انعكاسية جيدة وامتصاصية قليلة للطاقة المشعة، فقدرة السحاب على عكس الإشعاع تعتمد على كثافته وعلى حجم جزيئاته وتتراوح الانعكاسية للسحب بين (80%– 50%). كما أن نسبة ما تمتصه السحب من الإشعاع الواصل إليها لا يزيد عن 10%.

1–3–6 الانعكاس و عاكسية الأرض للإشعاع الشمسي (الألبيدو) ρ_{ground}:

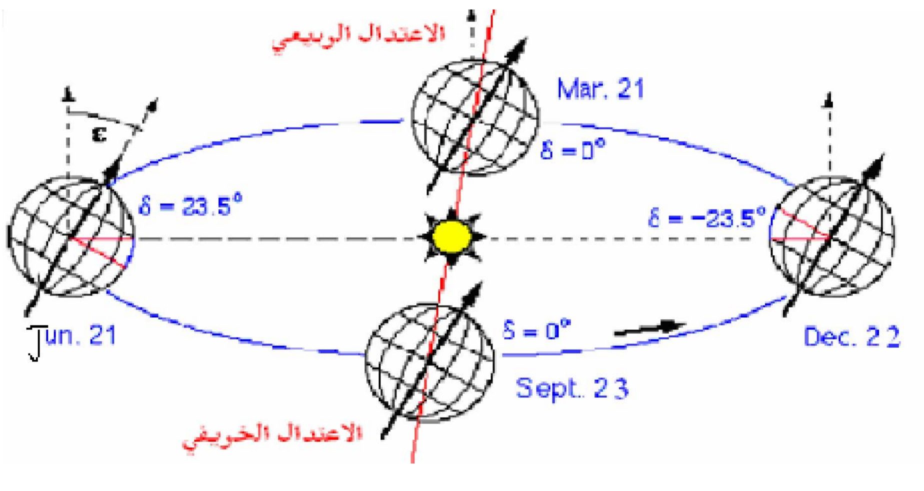
يتأثر الإشعاع الشمسي بالأرض عندما يسقط عليها فهي عــاكس رديء، حيــث تعتمــد عاكــسيتها للإشعاع الشمسي على نوع التربة. يعتمد مقدار الإشعاع المنعكس مــن الأرض علــى معامــل الانعكــاس للأرض والتي يُعرف بالألبيدو "ρ_{ground}" وتتراوح قيمته بين 0.2 للحالة العادية و 0.7 عند تواجد الثلوج.

1–3–7 أوضاع الأرض بالنسبة للشمس:

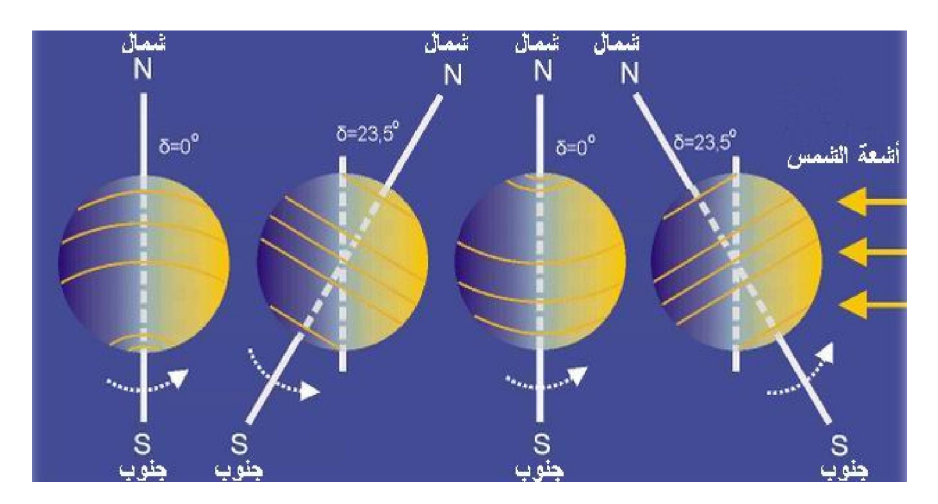
تدور الأرض حول نفسها دورة واحدة كل 24 ساعة مما يؤدي إلى تعاقب الليل والنهار. كما تدور حول الشمس في مدار اهليلجي دورة واحدة كل 365.25 يوم مما يؤدي إلى تشكّل الفصول الأربعة كما في الشكل (1–5).

تكون المسافة بين الأرض والشمس متغيرة على مدار العام، حيث تبلغ أقرب مسافة بين الأرض والشمس147.1×10^{6} km (الحضيض) و يكون ذلك في 3 كانون الأول و أبعد مسافة هي 152.1×10^{6} km (الأوج) و يكون ذلك في الأول من شهر تموز.(تزداد شدة الإشعاع الشمسي في فترة الحضيض بمعدل 7% عن الأوج)، أما معدّل المسافة بين الأرض والشمس فهو 149.5×10^{6} km.

تدور الأرض حول محور يميل بزاوية مقدارها °23.5 عن مدار دورانها حول الشمس كما في الشكل (1–6)**[4]** وهذا الميلان هام جداً لتوزيع الإشعاع الشمسي على سطح الأرض.



الشكل (1 – 5) تشكل الفصول



الشكل (1–6) ميلان الأرض عن محورها.

تستقبل الأرض كمية من الطاقة الشمسية بمعدل 1.2×10^{17} W [13] وهذا يعني أنّ ساعة واحدة من الطاقة الشمسيّة تكفي احتياجات العالم كله لسنة كاملة، لذلك فإنّ الإشعاع الشمسي يُعد مصدراً هاماً و رئيس للطاقة المتجددة.

1–3–8 العوامل المؤثرة على شدة الإشعاع الشمسي[14]:

تتأثر منظومات تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية أو كهربائية بعوامل متعددة عوامل تتحكم بكمية الطاقة الشمسية الواصلة إلى هذه المنظومات وهي:

أ– **المسافة بين الأرض والشمس:** تكون متغيرة لأنّ الأرض تدور حول الشمس وفقاً لمدار إهليلجي.

ب– **ميلان محور دوران الأرض:** يميل محور دوران الأرض حول نفسها بزاوية قدرها $23.5°$ عن مستوي دورانها حول الشمس، والذي بدوره يعمل على توزيع غير منظم للإشعاع الشمسي على سطح الأرض وبسببه تتشكل فصول السنة الأربعة.

ت– **صفاء الجو:** تعمل مكوّنات الغلاف الجوي (الغازات المختلفة و ذرات الغبار والأبخرة والغيوم) على تشتيت الإشعاع الشمسي أثناء مروره عبر هذا الغلاف، حيث يعتمد مقدار التشتيت على ظروف الجو.

ث– **الموقع الجغرافي:** بشكل عام يمكن القول بأنّ المناطق الواقعة على خطوط عرض قريبة من خط الاستواء يتوافر فيها الإشعاع الشمسي أكثر من غيرها.

ج– **موقع الأسطح المستقبلة للإشعاع الشمسي:** إنّ تواجد هذه الأسطح في مكان مزدحم بالعمران والأشجار قد يحول دون وصول الإشعاع المباشر له وهذا يؤثر على أدائها.

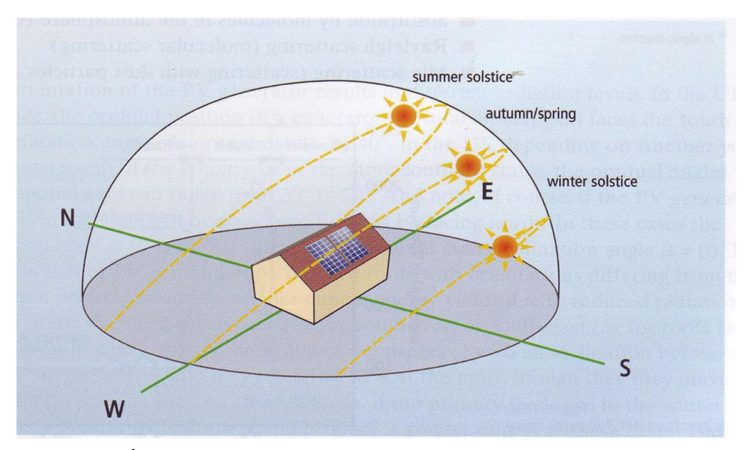
ح– **توجيه الأسطح المستقبلة للإشعاع الشمسي:** يلعب توجيه هذه الأسطح دوراً هاما في الحصول على الطاقة الشمسية، فالأسطح التي توجه نحو الجنوب في نصف الكرة الشمالي ونحو الشمال في نصف الكرة الجنوبي تتميز بالتقاطها لكمية أكبر من الإشعاع الشمسي من الأسطح الموجهة باتجاهات

أخرى. كما أنّ الأسطح التي يتم تزويدها بنظام تتبع لحركة للشمس تستقبل إشعاع شمسي أكبر بكثير من الأسطح غير المزوّدة بمثل هذه الأنظمة.

خ- **الوقت في النهار:** تتأثر كمية الإشعاع الشمسي الذي تتلقاه الأسطح المستقبلة لهذا الإشعاع بالوقت من النهار، فبشكل عام تتلقى هذه الأسطح أكبر ما يمكن من الإشعاع الشمسي في وقت الظهيرة عن باقي الأوقات من النهار.

د- **الوقت في السنة:** تتأثر كمية الإشعاع الشمسي الذي تتلقاه الأسطح المستقبلة لهذا الإشعاع بالوقت من السنة، حيث يتوافر الإشعاع الشمسي في فصل الصيف أكثر من غيره من الفصول لطول نهاره وقصر ليله. حيث يلتقط نصف الكرة الشمالي خلال الانقلاب الشتوي نسبة أقل من الطاقة الشمسية مقارنة مع الصيف، وذلك لأنّ الأشعة الشمسية تعبر مسافة طويلة في الغلاف الجوي كلّما ارتفعت زاوية السقوط كما في الشكل (1-7).

ذ- **الظروف الجوية:** تُعد السحب من العوامل الجوية الأكثر تأثيراً على الإشعاع الشمسي الواصل إلى الأسطح المستقبلة له والتي قد تحجب ما يزيد عن 50% من الإشعاع الكلي الواصل لهذه الأسطح.



الشكل (1-7) منحني دوران الشمس في الفصول الأربعة [5]

1-3-9 الزوايا الشمسية[15]:

بما أنّ شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض تابعة لموقع الأرض بالنسبة للشمس، فإنه من الضروري تحديد بعض الزوايا الهندسية الموضحة للعلاقة بين سطح الأرض والشمس (زاوية خط العرض، زاوية الانحراف الشمسي، الزاوية الساعية).

كما أنه من الضروري تحديد موقع الشمس بالنسبة للسماء ويتم ذلك خلال زوايا أخرى (زاوية السمت الشمسي الأفقية، زاوية ارتفاع الشمس، زاوية السمت الشمسي الرأسية).

يجب أيضاً من أجل حساب الإشعاع الشمسي الساقط على سطح مائل حساب بعض الزوايا التي تتعلق بالسطح وهي: (زاوية ميل السطح، زاوية سمت السطح، زاوية السقوط الشمسي على السطح).

سوف نستعرض هذه الزوايا تباعاً كما يأتي:

1-3-9-1 زاوية خط العرض (L):

تعرّف زاوية خط العرض لنقطة ما بالموقع الزاوي لهذه النقطة بالنسبة إلى مستوي خط الاستواء، أو هي الزاوية المحصورة بين الخط الواصل بين النقطة المعتبرة على سطح الأرض مع مركز الأرض وبين مسقط هذا الخط على المستوي المار من خط الاستواء، كما في الشكل (1–8). تأخذ هذه الزاوية قيماً تتراوح ضمن المجال (0°–90°) شمال أو جنوب خط الاستواء، حيث تُعدُّ موجبة في شمال خط الاستواء وسالبة في الجنوب منه.(تقع سوريا بين خطي عرض (32.5°-37°)).

1-3-9-2 زاوية الميل الشمسي (δ)[16]:

تدور الأرض حول الشمس مرة كل 365.25 يوم في مدار اهليلجي، كما يميل محور دوران الأرض حول نفسها بمقدار 23.45° بالنسبة إلى مستوي مدارها حول الشمس، وتُعرف زاوية الميل الشمسي بأنّها المسافة الزاوية لأشعة الشمس بالنسبة لمستوي خط الاستواء أو هي الزاوية بين الخط الواصل بين مركزي الأرض والشمس ومسقط هذا الخط على مستوي خط الاستواء كما في الشكل (1–8). نتيجة للمسار الاهليلجي للأرض حول الشمس فإن قيم زاوية الانحراف تتغير بين (+23.45°) في الانقلاب الصيفي و (−23.45°) في الانقلاب الشتوي، أما قيمة هذه الزاوية في الاعتدالين الربيعي والخريفي فهي معدومة.

يُعبر عن زاوية الانحراف الشمسي (بالدرجة) لأي يوم في السنة بالمعادلة التجريبية الآتية[16]:

$$\delta = 23.45 \cdot Sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right] \qquad (2\text{-}1)$$

حيث أنّ:

n : رقم اليوم في السنة.

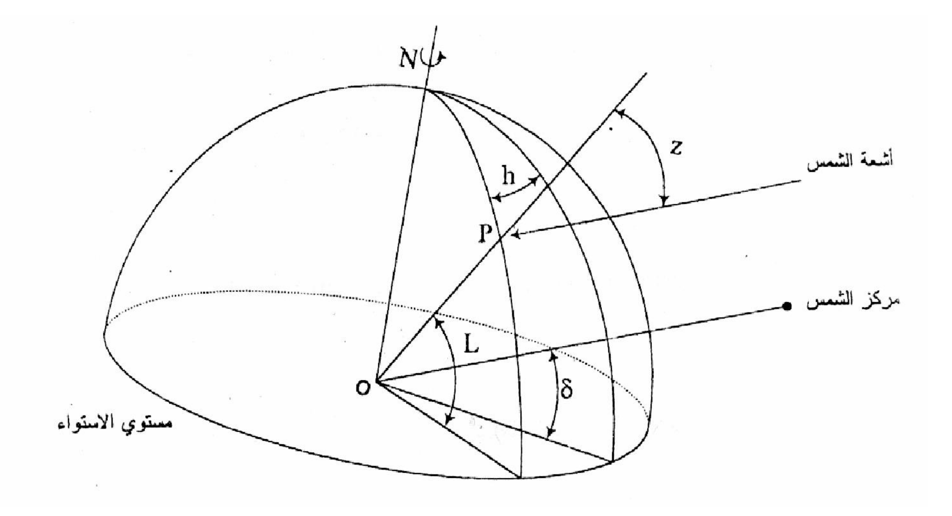
1-3-9-3 الزاوية الساعية(h):

تعرّف بأنها الزاوية الواجب أن تدورها الأرض لتضع خط طول النقطة المعتبرة تحت الشمس مباشرة (الشمس عمودية عليه)، أو هي الزاوية المُقاسة على مستوي خط الاستواء بين مسقط الخط الواصل بين مركزي الأرض والشمس ومسقط الخط الواصل بين مركز الأرض والنقطة المعتبرة على سطح الأرض كما في الشكل (1–8)[12].

تكون الزاوية الساعية عند الظهر الشمسي مساوية للصفر وتُفرض موجبة بعد الظهر، لذلك يمكن كتابة الزاوية الساعية بالدرجات كما يأتي [12]:

$$\text{h} = \pm\frac{1}{4}(\text{number of minutes from local solar noon}) \qquad (3\text{-}1)$$

حيث: تدل الإشارة الموجبة على ساعات بعد الظهر، أما الإشارة السالبة فهي تخص ساعات الصباح.



الشكل (1–8) بعض الزوايا الشمسية التي تحدد العلاقة بين الأرض والشمس (زاوية خط العرض L، الزاوية الساعية h، زاوية الميل الشمسي δ).

1–3–9–4 زاوية ارتفاع الشمس (α)[12] :

هي الزاوية بين أشعة الشمس والمستوي الأفقي، أو هي الزاوية بين الخط الواصل للنقطة المعتبرة على سطح الأرض مع مركز الشمس وبين مسقط هذا الخط على المستوي الأفقي الذي يمر بالنقطة المعتبرة. يظهر الشكل (1–9) هذه الزاوية.

1–3–9–5 زاوية السمت الشمسي الرأسية (Z):

هي الزاوية المحصورة بين الخط الواصل للنقطة المعتبرة على سطح الأرض مع الشمس (الإشعاع الشمسي) وبين الخط العمودي على المستوي الأفقي (انظر الشكل 1–9). يكون المجموع لهذه الزاوية وزاوية ارتفاع الشمس هو:

$$Z + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \qquad (4\ -1)$$

تُحسب هذه الزاوية من العلاقة الآتية:

$$\cos Z = \sin\alpha = \sin L.\sin\delta + \cos L \cos\delta \cosh \qquad (5\text{-}1)$$

حيث إنّ: L زاوية خط العرض، وα زاوية ارتفاع الشمس، δ زاوية الميل الشمسي، h الزاوية الساعية.

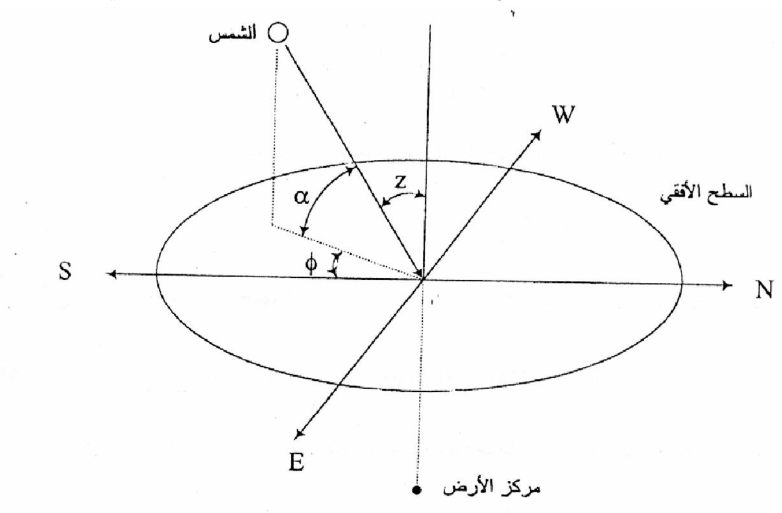
1–3–9–6 زاوية السمت الشمسي الأفقية (φ):

هي الزاوية المقاسة في المستوي الأفقي بين الخط المار من النقطة المعتبرة على سطح الأرض والمتجه جنوباً وبين المسقط الأفقي للخط الواصل بين النقطة المعتبرة على سطح الأرض وبين الشمس (الإشعاع الشمسي) كما في الشكل (1–9). تكون قيمة هذه الزاوية معدومة في الجنوب ولها قيمة سالبة إلى الشرق من خط الجنوب وموجبة إلى الغرب من خط الجنوب.

تّحسب هذه الزاوية وفقا للعلاقة الآتية[21] :

$$\cos\phi = \frac{\sin\alpha \sin L - \sin\delta}{\cos\alpha \cos L} \qquad (6\text{-}1)$$

حيث إنّ: L زاوية خط العرض، α زاوية ارتفاع الشمس، δ زاوية الميل الشمسي



الشكل (1 – 9) بعض الزوايا التي تحدد موقع الشمس في السماء (زاوية السمت الرأسيةZ، زاوية الارتفاعα، زاوية السمت الأفقية Φ).[12]

1–3–9–7 زاوية ميل السطح (s):

هي الزاوية بين السطح و المستوي الأفقي (انظر الشكل 1–10). تُعد هذه الزاوية موجبة من أجل السطوح المواجهة للجنوب وسالبة من أجل السطوح المواجهة للشمال.

1–3–9–8 زاوية سمت السطح (Ψ):

هي الزاوية المقاسة في المستوي الأفقي بين مسقط المستقيم المتعامد مع السطح والجنوب (انظر الشكل 1–10). تُعدُّ هذه الزاوية معدومة في الجنوب وموجبة إلى الغرب من خط الجنوب وسالبة إلى الشرق منه.

1–3–9–9 زاوية السقوط الشمسي (i):

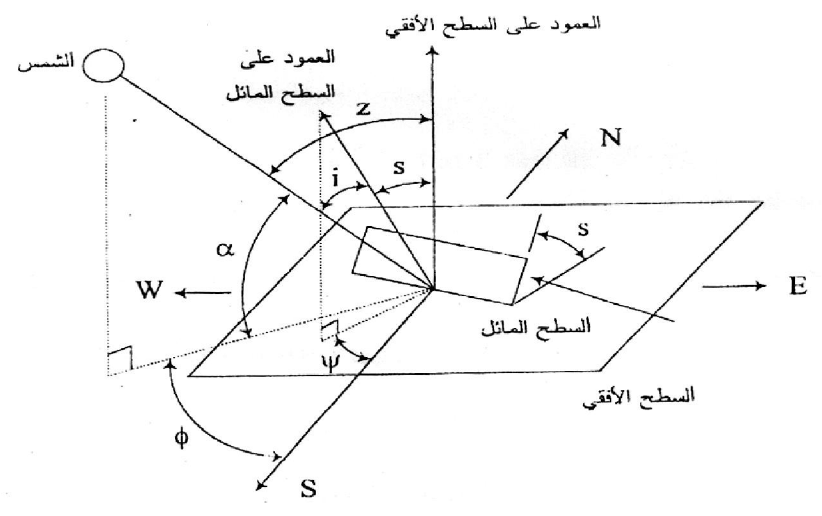
هي الزاوية المحصورة بين الإشعاع الشمسي الساقط على السطح وبين الخط العمودي على هذا السطح، كما في الشكل (1– 10).

تظهر العلاقة الآتية علاقة هذه الزاوية بالزوايا الأخرى كما يأتي:

$$\cos i = \sin\alpha.\cos s + \cos\alpha \sin s \cos(\phi - \psi) \qquad (7\text{-}1)$$

تكون هذه الزاوية من أجل السطح الأفقي ($s = 0^o$) مساوية لزاوية السمت الشمسي الرأسية أي: ($z = i$) ومن ثمّ يكون $\cos i = \sin\alpha$. أما من أجل السطح العمودي ($s = 90^o$) فيكون:

$$\cos i = \cos\alpha.\cos(\phi - \psi) \qquad (8\text{-}1)$$



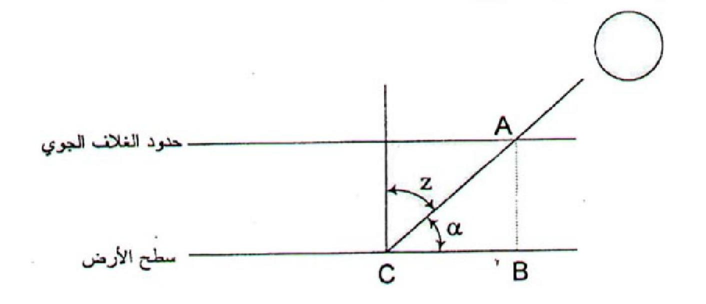
الشكل (1−10) بعض الزوايا المتعلقة بالسطح المتلقي للإشعاع الشمسي (زاوية ميل السطح s، زاوية سمت السطح Ψ، زاوية سقوط الإشعاع i)[12]

1−3−10 حساب الإشعاع الشمسي:

1−3−10−1 الإشعاع الشمسي على سطح أفقي [12]:

يمر الإشعاع الشمسي قبل وصوله إلى سطح الأرض عبر الغلاف الجوي، فيتعرض خلال هذا المرور للامتصاص والتشتيت بوساطة مكونات هذا الغلاف. يتوقف مقدار التناقص في الإشعاع الشمسي المار عبر الغلاف الجوي عند زمن محدد على مكونات هذا الغلاف وعلى طول المسار الذي يجتازه الإشعاع خلال هذا الغلاف. يحدد طول هذا المسار بدلالة كتلة الهواء كنسبة بين كثافة الغلاف في مسار (الأرض−الشمس) الفعلي إلى كثافته عندما تكون الشمس عمودية أي عندما تكون الشمس عند السمت الرأسي. باستثناء الحالة التي تكون فيها زاوية سمت الرأس كبيرة حيث يكون تقوس الأرض ذا أهمية، فإنّه يتم حساب كثافة الهواء بالنسبة لزاوية سمت الرأس (z) أو لزاوية ارتفاع الشمس (α) بالعلاقة (1−9) الموضحة بالشكل(1−11):

$$m=\frac{AC}{AB}=\frac{1}{\cos Z}=\frac{1}{\sin\alpha} \qquad (9\text{-}1)$$



الشكل (1− 11) العلاقة بين كثافة الهواء m، وزاوية السمت الرأسية (z)، وزاوية ارتفاع الشمس (α)

تكون m = 1 عند مستوى سطح البحر عندما تكون الشمس عمودية أي عند (z=0)

يتكون الإشعاع الشمسي على سطح الأرض من نوعين أساسين من الإشعاعات، كما في الشكل(1–12) وهما:

- الإشعاع الشمسي المباشر الوارد من الشمس دون أي تغير في الاتجاه، ويسمى الإشعاع المباشر.
- الإشعاع المبعثر أو المنتشر وهو الإشعاع الصادر عن الوسط المحيط بالكرة الأرضية (الأشعة الشمسية الممتصة من قبل المواد الموجودة عليها والصادرة عنها ثانيةً) وهو يصدر من سطح الأرض ومن المواد العالقة بالوسط المحيط بالأرض.

يُمكن التعبير عن شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض في يوم صحو بالعلاقة الأتية [12]:

$$H_{Bn} = Ae^{-\frac{B}{\sin\alpha}} = Ae^{-Bm} \qquad (10-1)$$

حيث إنّ:

H_{Bn} : الإشعاع الشمسي المباشر الساقط سقوطاً حراً [W/m²]

A : الإشعاع الشمسي النظري عند كثافة هواء تساوي الصفر [W/m²]

B : معامل توهين الغلاف الجوي.

α: زاوية ارتفاع الشمس.

m : كثافة الهواء.

يُحسب الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي من العلاقة التالية:

$$H_B = H_{Bn} \cdot \sin\alpha \qquad (11-1)$$

يتوقف تغيّر قيم (A) و(B) على التغير السنوي للمسافة بين الأرض والشمس و على التغير الفصلي في محتوى الغلاف الجوي من الرطوبة ومكونات أخرى. يظهر الجدول (1–2) قيم هذه الثوابت وثابتاً آخر هو (C) لليوم الحادي والعشرين من كل شهر حسب كتاب (ASHRAE) (الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء).

يُعطى الإشعاع المبدد من السماء والساقط على سطح اختياري على الأرض حسب (ASHRAE) كنسبة من الإشعاع المباشر الساقط بشكل حر كما يأتي:

$$H_d = C \cdot H_{Bn} \cdot F_{ss} \qquad (12-1)$$

حيث أنّ:

H_d: الإشعاع المبدد من السماء [W/m²]

C: معامل تشتيت الإشعاع.

F_{ss} : المعامل الزاوي بين السطح والسماء ويعطى لسطح كيفي يميل بزاوية s بالعلاقة:

حيث: $Fss = 0.5\ (1+\cos s)$ ، $Fss = 0.5$ للسطح العمودي، $Fss = 1$ للسطح الأفقي.

يكون الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح أفقي هو مجموع الأشعة المباشرة والمبددة أو المبعثرة أي:

$$H = H_B + H_d \qquad (13\text{-}1)$$

الجدول (1 – 2) قيم الثوابت لعلاقات ASHRAE لليوم 21 من كل شهر.

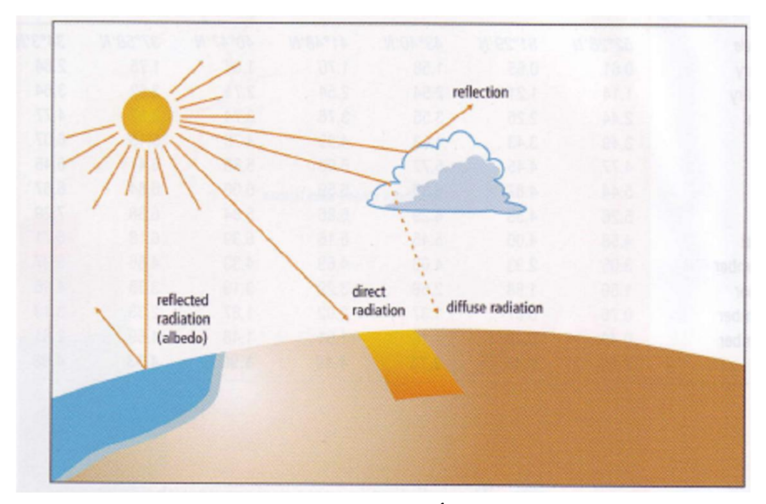
الشهر	A	B	C
Jan.	1230	0.142	0.058
Feb.	1215	0.144	0.060
Mar.	1185	0.156	0.071
April	1136	0.180	0.097
May	1104	0196	0.121
June	1088	0.205	0.134
July	1085	0.207	0.136
Aug.	1107	0.201	0.122
Sept.	1152	0.177	0.092
Oct.	1193	0.160	0.073
Nov.	1221	0.149	0.063
Dec.	1234	0.142	0.057

1-3-10-2 الإشعاع الشمسي على سطح مائل:

تتوقف شدة الإشعاع الساقط على سطح ما لموقع محدد عند زمن ما على توجيه وميل السطح. بالرغم من الوضوح أنّ السطح المتعامد مع أشعة الشمس سوف يستقبل أكبر كمية من الإشعاع الشمسي، لكن عملية تتبع الشمس غالباً قد تكون مكلّفة وغير عملية وفي كثير من الحالات تبين أنّ الحل الأكثر ملائمة هو باستخدام اللواقط المائلة في الإنشاءات العمليّة حيث يكون من الضروري حساب الإشعاع الشمسي الساقط على الأسطح المائلة.

يتكون الإشعاع الشمسي الساقط على السطح المائل من ثلاثة أنواع من الإشعاعات يظهرها الشكل (1–12) وهي:

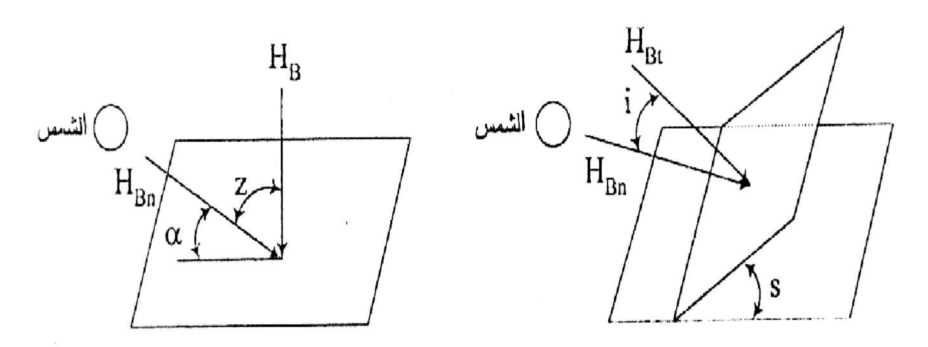
- الإشعاع الشمسي المباشر.
- الإشعاع المبدد من السماء.
- الإشعاع المنعكس من الأرض.



الشكل (1–12) أنواع الإشعاع الشمسي [5].

تتوقف قيم هذه الأنواع من الإشعاعات على مدى مواجهة الأسطح المائلة للسماء.

يُظهر الشكل (1–13) الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على الأسطح الأفقية والمائلة.



الشكل (1 – 13) الإشعاع المباشر الساقط على الأسطح الأفقية والمائلة.

يمكن أن نكتب العلاقات الآتية:

$$\cos z = \frac{H_B}{H_{Bn}} \qquad (14-1)$$

$$\cos i = \frac{H_{Bt}}{H_{Bn}} \qquad (15-1)$$

حيث إن:

H_{Bt}: الإشعاع المباشر الساقط على السطح المائل $[W/m^2]$

$$R_B = \frac{H_{Bt}}{H_B} = \frac{\cos i}{\cos z} \qquad (16-1)$$

حيث إنّ:

R_B: معامل ميل الإشعاع المباشر.

تُعطى شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على الأسطح المائلة بشكل اختياري بالعلاقة الآتية:

$$H_t = H_{bt} + H_{dt} + H_{gt} \qquad (17 -1)$$

أي:

$$H_t = H_B R_B + H_d\left(\frac{1+\cos s}{2}\right) + H\rho_g\left(\frac{1-\cos s}{2}\right) \qquad (18 -1)$$

حيث إنّ:

ρ_g : معامل انعكاس الأرض للأشعة المباشرة والمبددة وتعتمد قيمته على طبيعـة سـطح الأرض. ففي حالة أرض غير مغطاة بالثلوج تؤخذ قيمته مساوية 0,2، أما في حالة الأرض المغطـاة بـالثلوج فتؤخذ قيمته مساوية 0,79.

الفصل الثاني

التحويل الشمسي الكهربائي

2-1 مقدمة:

تُعدُّ الطاقة الكهرضوئية (الفوتوفولتية) للشمس من أهم الطاقات البديلة التي تركّزت الدراسات حولها في العقود الأخيرة، وذلك لما لهذه الطاقة من أهمية من حيث نواتجها (الكهرباء) التي تتسم بمرونة عالية في الاستخدامات التي تتطلب طاقة. تعتمد هذه الطاقة بشكل رئيس على الفعل الفوتوفولتي والذي يُقصد به توليد الجهد الكهربائي لدى تعرّض سطح المنظومة إلى ضوء مناسب.

2-2 لمحة تاريخية عن التحويل الشمسي الكهربائي[17] :

يُمكن للطاقة الشمسية أن تتحول إلى طاقة كهربائية، كما ذكرنا في الفصل الأول، بطريقتين هما: الطريقة غير المباشرة عن طريق دارات ترموديناميكية، أما الطريقة الثانية (وهي الطريقة التي تهمنا في دراستنا) فهي الطريقة المباشرة، حيث يتم تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى طاقة كهربائية عن طريق الخلايا الفوتوفولتية والتي تعتمد على مبدأ التحويل الفوتوفولتي.

يعود الاستخدام الفوتوفولتي للطاقة الشمسية إلى أكثر من 150 سنة مضت عندما لاحظ العالم بكيرل في عام 1839م أنّ تيارات الالكترونات تنشأ كرد فعل كيميائي عند اصطدام الضوء ببعض المواد، ثم ركّب العالم فريتز في عام 1883م أول خلية شمسية من السيلينيوم. كما أنّ تطوّر وتقدم العلوم في النظرية الكوانتية وفيزياء الجسم الصلب عبّد الطريق عن إعلان لتصنيع أول خلية سيليكونيّة بمردود لا يتجاوز 1%، بعدها أعلنت مختبرات بل الأمريكية عن تصنيع خلية شمسية عام 1954 بمردود 6%. تمّ بعدها تصنيع أول خلية شمسية من مواد كبريت الكادميوم وكبريت النحاس، وبعد تلك الفترة تطورت الأبحاث في العلوم الفيزيائية والهندسية لأشباه الموصلات مما أدى إلى تطوير الخلايا الفوتوفولتية وتحسين كفاءتها وخفض كلفتها، حيث برز الاهتمام بشكل كبير وفعلي بالكهرباء المتولدة عن طريق الطاقة الشمسية عند حدوث أزمة النفط عام 1970م ، وعُدت الخلايا الفوتوفولتية إحدى الطرق العلمية الطموحة لتوليد الكهرباء من المصادر المتجددة للطاقة.

2-3 مزايا استخدام الخلايا الفوتوفولتية وتطور انتشارها [12]:

يتصف التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية (التحويل الفوتوفولتي) بمزايا متعددة مقارنة مع التحويل الترموديناميكي أهمها:

أ- عدم الحاجة إلى تنظيم المراحل والعمليات الحرارية اللازمة.

ب- تُعد بنية محطات القدرة المعتمدة على الخلايا الفوتوفولتية أبسط بكثير، حيث يُعد التحويل المباشر عملية ساكنة إلى حد بعيد لذا تكون كلفة التشغيل و الصيانة منخفضة جداً.

ت- بما أنّ هذه الخلايا تولد الطاقة الكهربائية بشكل مباشر سيكون من السهل استثمارها في المناطق البعيدة والنائية.

ث- إمكانية تصميم هذه الخلايا بحجوم و مراديد مختلفة ومهام متنوعة و يمكن أن تتألف من أقسام مستقلة.

ج- إمكانية تطوير صناعة الخلايا الفوتوفولتية وذلك بهدف إنقاص حجمها وكلفتها وزيادة استطاعتها.

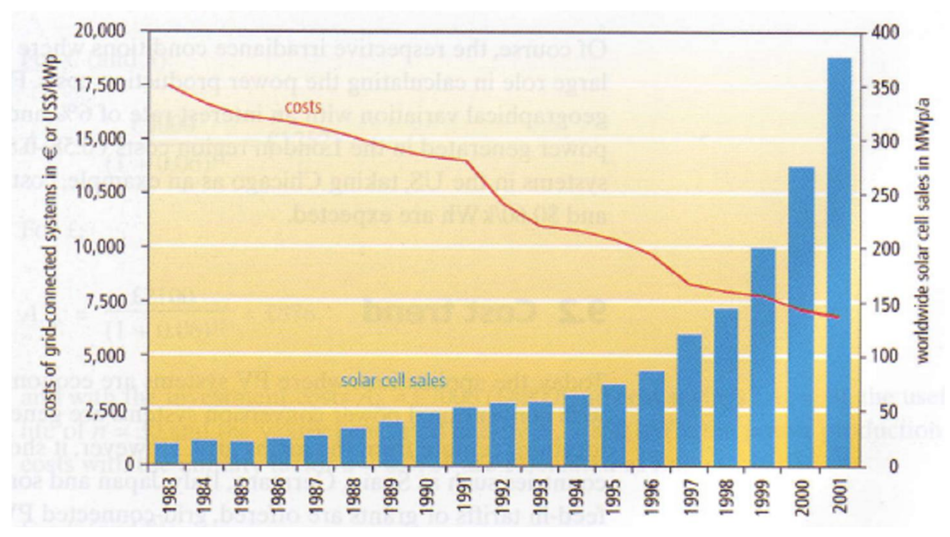
ح- تُعد الخلايا الفوتوفولتية ذات موثوقيّة عمل عالية.

خ- إنّ الخلايا الفوتوفولتية قادرة على العمل بكفاءة وجودة عالية ولمدة طويلة غير محدودة نظرياً.

د- لا تنتج أيّة ملوثات للبيئة.

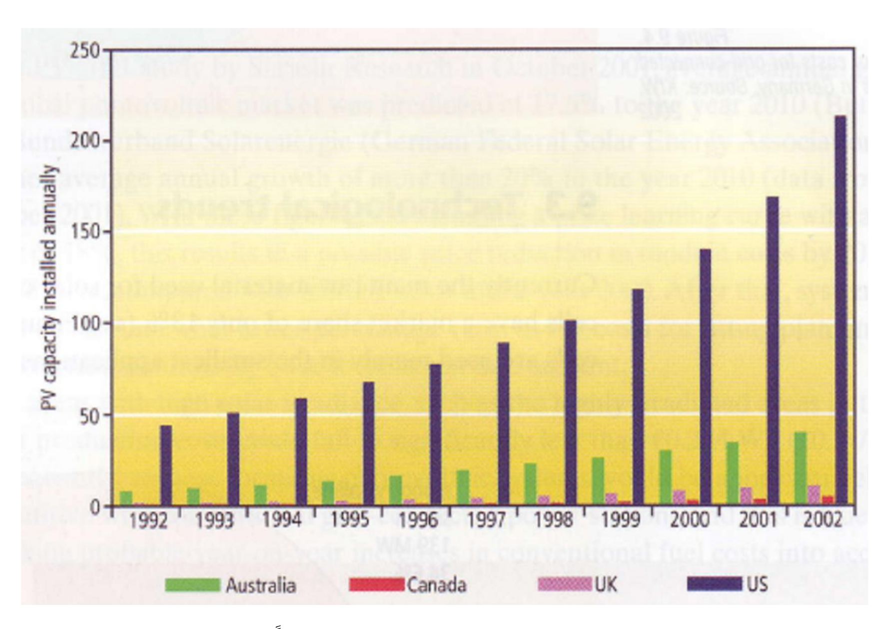
ذ- يمكن أن تصل كفاءة الخلايا الفوتوفولتية إلى حوالي 25% وأكثر وهذا ما يعادل محطات توليد الطاقة الكهربائية الحرارية تقريباً.

تُعدُّ استجابة الخلايا الشمسية للإشعاع الشمسي فوريّة أي أنّ الطاقة الكهربائية تنتج في حال سقوط الإشعاع الشمسي على الخلية، حيث لا تحتاج الخلية إلى وقت يُذكر كي تستجيب للإشعاع. لكن الدراسات مازالت مستمرة للوصول إلى توازن بين الكفاءة والسعر، حيث كان السبب الرئيس لعدم انتشار الخلايا الفوتوفولتية المصنعة من أنصاف النواقل في الحياة العملية في عام 1970 هو ارتفاع أسعارها بالنسبة لواحدة الاستطاعة المركبة. و لكن بفضل تقدّم تكنولوجيا إنتاج هذه الخلايا وتحسين نوعية العمل فقد انخفضت هذه الكلفة، وما زال العمل مستمراً لتقليل السعر وتحسين الكفاءة. يبين الشكل (2-1) تطوّر المبيعات العالميّة للخلايا الفوتوفولتية وكلفة الأنظمة الفوتوفولتية الموصولة بالشبكة.



الشكل (2-1) تطور المبيعات العالمية للخلايا الفوتوفولتية وكلفة الأنظمة الفوتوفولتية الموصولة بالشبكة.[5]

لكن ازدياد الطلب على هذه الخلايا ساهم في تخفيض سعرها مصحوباً بالعمل على رفع كفاءتها وتوسيع مجالات استخدامها، حيث يُتوقع قريباً بأن تصل تكلفة الكيلو وات الساعي المُنتج بوساطة الخلايا الفوتوفولتية إلى أقل من (0.1 $ /kWh)، وبذلك ستصبح هذه الكهرباء المنتجة بوساطة الخلايا منافسة للكهرباء المولدة بالطرق التقليدية. يبين الشكل (2-2) تطوّر الاستطاعة المنتجة من الخلايا الشمسية سنوياً والمركبة في عدد من الدول.



الشكل (2-2) تطور الاستطاعات المنتجة من الخلايا الشمسية سنوياً والمركبة في عدد من الدول.[5]

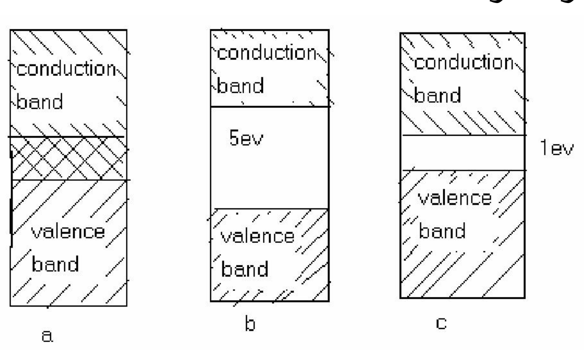
2-4 النواقل والعوازل وأنصاف النواقل [18]:

تكون المادة قادرة على نقل التيار الكهربائي إذا احتوت على شحنات متحركة في داخلها، ويمكن لالكتروناتها الحرة (الموجودة في حزمة الناقلية) أن تتحرك بشكل عشوائي داخل الجسم الصلب، ويمكن أن تحمل الشحنات من نقطة لأخرى عندما يُطبق حقل خارجي عليها.

تحتوي النواقل المتمثلة بالمعادن كالنحاس والفضة وغيرها على عدد كبير من الالكترونات الحرة عند درجة حرارة الغرفة، حيث لا يوجد فجوة طاقية ممنوعة بالنسبة للالكترونات بين حزمة التكافؤ وحزمة الناقلية (انظر الشكل 2-3-a). تكون طاقة حزمة التكافؤ تساوي طاقة حزمة الناقلية في هذه المعادن، لذا من السهل جداً لالكترون التكافؤ أن يصبح الكتروناً ناقلاً بدون تزويده أي طاقة إضافية، ومن ثمّ تُعدُّ المعادن نواقل جيدة للطاقة الكهربائية.

أما المواد العازلة فلها فجوة طاقية عريضة حوالي (5eV) أو أكثر (انظر الشكل 2-3-b)، لذلك لا يستطيع الالكترون الموجود في حزمة التكافؤ أن يقفز عبر هذه الثغرة ليصل إلى حزمة الناقلية إلا في حالات خاصة جداً (وضع العازل تحت جهد عالي جداً أو عند درجات حرارة عالية جداً).

بينما تتميز المواد نصف الناقلة بفجوة طاقية ليست عريضة حوالي (1eV) (انظر الشكل 2–3–c)، فهي في الجرمانيوم (0.78eV) وفي السيليسيوم (1.21eV)[2]. فعند تزويد الطاقة بوساطة الحرارة تنتقل الالكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة الناقلية، كما أنّ المواد نصف الناقلة قادرة على نقل جزء من التيار الكهربائي عند درجة حرارة الغرفة.



الشكل (2 – 3) حزم التوصيل والتكافؤ والفجوة الطاقية لكل من المعادن والعوازل وأنصاف النواقل.[18]

إنّ أهم الانجازات التي تمّ تحقيقها في هذا القرن في عالم أنصاف النواقل (السيليكون، الجرمانيوم،.....الخ) هي إمكانية التحكم بتوصيلها للتيار الكهربائي وذلك عن طريق إضافة كميات صغيرة جداً من بعض الشوائب إليها، حيث يمكن إضافة الزرنيخ إلى الجرمانيوم مثلاً ليعطي مادة ذات صفات أكبر في المواد نصف الناقلة. كما يمكن إشابة السيليكون بإضافة البورون أو الفوسفور إليه.

يتميز الجرمانيوم بأنّ كل ذرة من ذراته ترتبط بأربع روابط تساهمية مع ذرة أخرى، فعند إضافة شائبة مثل الجاليوم إلى الجرمانيوم فإنّ ذرة جاليوم تأخذ مكان ذرة جرمانيوم، وبما أنّ إحدى الروابط ناقصة بمقدار الكترون واحد (عدد الالكترونات في حزمة التكافؤ للجاليوم هي أقل منها للجرمانيوم) ومن ثمّ ينتج ثقب. يمكن تحت تأثير جهد كهربائي أن يتحرك الكترون من ذرة مجاورة لملء هذا الثقب، فينشأ ثقب آخر في مكان آخر وينتج التوصيل الكهربائي عن هجرة هذا الثقب الموجب عبر البلورة. يقال عندها عن هذه المادة بأنها نصف ناقل من النوع (p) بسبب الطبيعة الموجبة لحامل الشحنة.

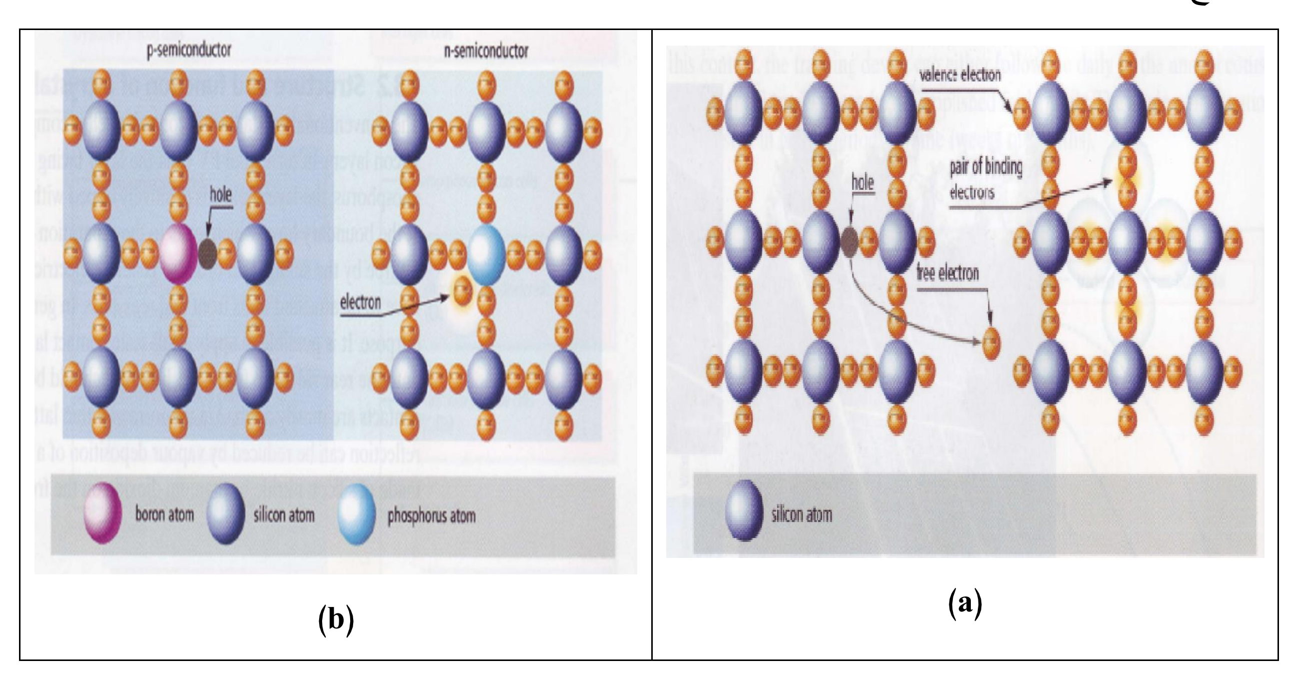
أما إشابة الجرمانيوم بالزرنيخ الذي يتميز بأنّ له الكترون إضافي عن الجرمانيوم في حزمة التكافؤ، ومن ثمّ تستطيع الالكترونات الإضافية لذرات الزرنيخ التي حلّت مكان بعض ذرات الجرمانيوم أن تتحرك عبر المادة عند تطبيق جهد كهربائي عليها. تدعى بلورة الجرمانيوم المعالجة بالزرنيخ بـــشبه موصل من النوع (n) لأنّ التوصيل يتم بوساطة الالكترونات السالبة.

يُعد السيليكون من أنصاف النواقل التي تمتاز ببنيتها البلورية النقية، فذرة السيلكون تحوي 14 الكترون مرتّبة في ثلاث مدارات مختلفة، حيث يكون المداران الأول والثاني وهما الأقرب إلى المركز ممتلئتين تماماً، أما المدار الثالث فهو نصف ممتلئ ويحوي أربعة الكترونات (يشكل المدار الثالث حزمة التكافؤ). تتشارك كل ذرة سيليكون مع ذرة سيلكون مجاورة لها بأربعة الكترونات وهذا ما يُدعى بالشكل البلوري، و من ثمّ لا يبقى أي الكترون حر لذلك يُعد السيلكون النقي ناقل رديء للتيار الكهربائي.كما في الشكل

(2–4–a) لكن يمكن إشابة السيليكون بإضافة بعض العناصر كالبورون والفوسفور، وبذلك يمكن استخدامه في الخلايا الفوتوفولتية لتوليد التيار الكهربائي، حيث يُعد السيليكون أحد أهم أنصاف النواقل المستخدمة في تصنيع هذه الخلايا لكن السيليكون كمادة نقية لا يوجد في الطبيعة بشكل منفرد بل متحداً مع عناصر أخرى، كما أنّ السيليكون هو من أكثر العناصر انتشارًا على سطح الأرض بعد الأوكسجين، وهو موجود في الطبقات الخارجية للأرض ويوجد في الطبيعة على هيئة أكسيد السيليكا (SiO_2).

تتشكل مادة السيليكون النصف ناقل من النوع الايجابي (p) بإشابة السيليكون بالبورون الذي تحوي كل ذرة منه في حزمة التكافؤ على ثلاثة الكترونات، بينما تحوي ذرة السيليكون على أربعة الكترونات. فعندما تحل ذرة بورون محل ذرة سيليكون يبقى ثقب إيجابي الشحنة حراً بدلاً من الإلكترون الرابع المفقود (انظر الشكل 2–4-b)، وهكذا من أجل عدة ذرات يتشكل عدد من الثقوب ومن ثمّ يصبح السيليكون نصف ناقل من النوع الايجابي الشحنة.

أما مادة السيليكون النصف ناقل من النوع السلبي (n)، فيمكن الحصول عليها بإشابة السيليكون بالفوسفور الذي تحوي كل ذرة منه في حزمة التكافؤ على خمسة الكترونات، بينما تحوي ذرة السيليكون على أربعة الكترونات. فعندما تحل ذرة فوسفور محل ذرة سيليكون يبقى الكترون سالب الشحنة حراً (انظر الشكل 2–4–b)، وهكذا من أجل عدة ذرات يتشكل عدد من الالكترونات الحرة و من ثمّ يتشكل السيليكون نصف ناقل من النوع السالب الشحنة.



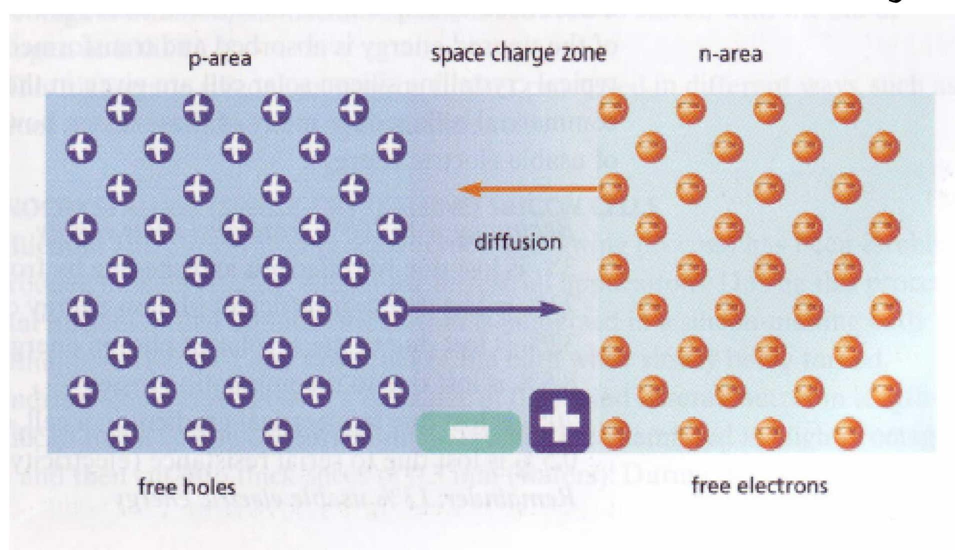
الشكل (2 –4)a- ذرة السيلكون , b– تشكّل نصف الناقل من النوع (p) ومن النوع (n) [5].

2–5 الخلية الفوتوفولتية ومبدأ عملها:[5] [18]

يطلق مفهوم الخلية الشمسية أو الخلية الفوتوفولتية على الأجهزة التي تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء بشكل مباشر معتمدة بذلك على الفعل الفوتوفولتي، والذي ينجم عنه توليد التيار الكهربائي عند

سقوط الأشعة الشمسية على الخلية. تُحدث الفوتونات التي تكون طاقتها أكبر من طاقة ربط الالكترون بالذرة الأثر الكهرضوئي أو الفوتوفولتي، أما الفوتونات التي تكون طاقتها أقل من ذلك فإنها تُمتص وتولد الحرارة دون إحداث لهذا الأثر.

إذا تمّ توصيل طبقتين من أنصاف النواقل من النوعين(n) و (p) يتشكّل اتصال (p–n junction). يؤدي ذلك إلى انتشار الالكترونات الفائضة من نصف الناقل (n) إلى نصف الناقل (p). ينتج عن ذلك تشكّل منطقة لبعض حوامل الشحن الحرة (انظر الشكل 2–5) والتي تدعى بمنطقة الشحن الفراغية (Space Charge Zone). تبقى خلف المنطقة (n) للانتقال الذرات المشوبة ايجابياً وعلى حدود المنطقة (p) الذرات المشوبة سلبياً. يتولد حقل كهربائي والذي يكون معاكس لحركة حوامل الشحن، وهذا يؤدي إلى تقييد عملية الانتشار.

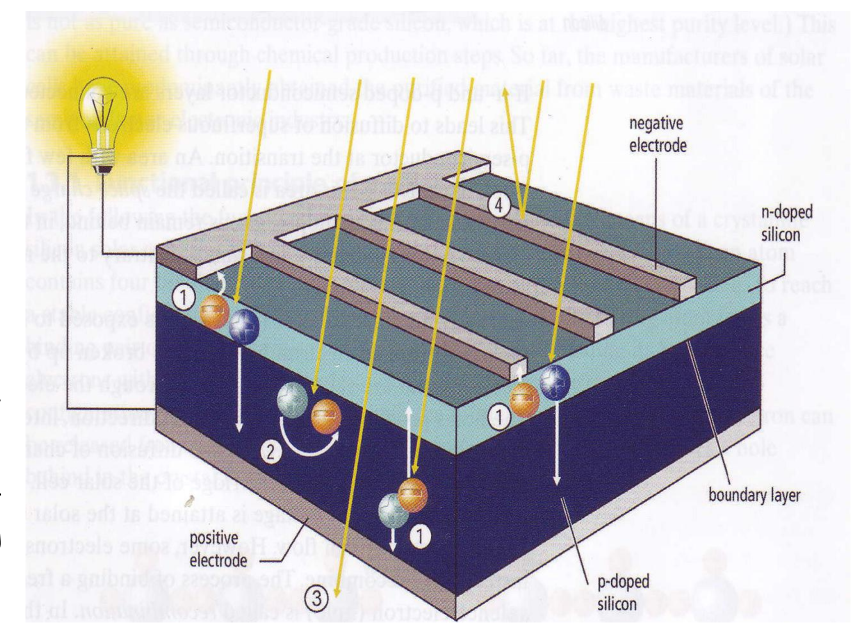


الشكل (2 – 5) تشكل منطقة الشحن الفراغية عند منطقة الاتصال (p – n junction) من خلال انتشار الالكترونات والثقوب لدى غياب الإشعاع الشمسي [5].

إذا تعرضت خلية شمسية مكوّنة من اتصال (p–n junction) للضوء، كما في الشكل (2–6)، تقوم الالكترونات بامتصاص الفوتونات الضوئية، حيث تستطيع تلك الفوتونات (ذات الطاقة الأكبر من عرض الثغرة الممنوع على الإلكترونات التواجد فيها) تحطيم روابط الالكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ، وبذلك تصبح هذه الالكترونات حرة الحركة وتُسحب بوساطة الحقل الكهربائي إلى حزمة الايصاليّة وتتركز في المنطقة (n)، أما الثقوب المتشكلة نتيجة انتقال الالكترونات فتتحرك في الاتجاه الآخر إلى المنطقة (p) ويسمى ذلك بالفعل الفوتوفولتي.

يصل انتشار حوامل الشحن إلى منطقة الاتصال الكهربائي مسبباً جهداً على حافة الخلية الشمسية. فعند عدم توصيل الخلية إلى أي حمل كهربائي يتحقق جهد الدارة المفتوحة في الخلية، أما إذا أغلقت الدارة الكهربائية فيتولد التيار الكهربائي.

إن بعض الالكترونات التي لاتصل إلى منطقة الاتصال تعود وتتحد، حيث تسمى عملية ارتباط هذه الالكترونات الحرة بذرة بدون الكترون تكافؤ (ثقب) يسمى بإعادة الاتحاد (Recombination)



1- انفصال الشحن
2-إعادة الإتحاد
3-الفوتونات غير المستخدمة
4-الإنعكاس والتظليل لسطح الخلية بالمتصل الأمامي

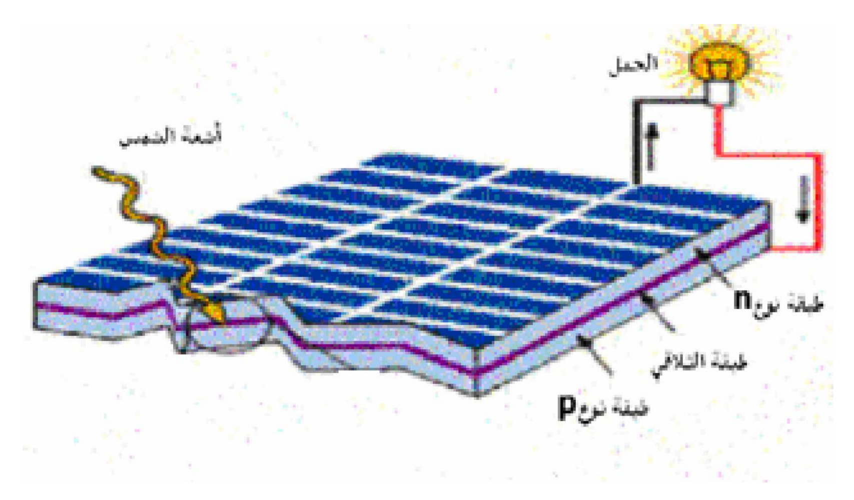
الشكل (2 – 6) مبدأ عمل الخلية الفوتوفولتية [5].

2 – 6 مكوّنات وعمل خلية شمسية من السيليكون البلوري:[12]، [5]

تتألف الخلية الشمسية (الخلية الفوتوفولتية) التقليدية المصنوعة من السيليكون البلوري، كما في الشكل (2–7)، من طبقتين من السيليكون المشوب، إحداهما طبقة من النوع (n) (مشوبة بالفوسفور) أي مشوبة سلبياً، والأخرى طبقة من النوع (p) (مشوبة بالبورون) أي مشوبة إيجاباً. تكون الطبقة المواجهة لضوء الشمس هي الطبقة من النوع (n)، أما الطبقة السفلية فتكون من النوع (p). يتم وصل هذين النوعين مع بعضهما وعندها يتم تشكيل حقل كهربائي يلعب دوراً هاماً في عمل الخلية الشمسية، حيث يقوم بدور الديود الذي يسمح للالكترونات بالانتقال من المنطقة (n) إلى المنطقة (P) ولكن فقط في دارة خارجية. و من ثمّ يسهم في استمرارية عمل الخلية وتوليدها للتيار الكهربائي وذلك عند سقوط الضوء عليها. تقوم الفوتونات الضوئية بتشكيل أزواج (الكترون– ثقب)، فالفوتون يمتلك طاقة تنتزع الالكترون من مداره الخارجي مخلّفاً وراءه ثقباً. إذا تمَّ ذلك في الطبقة (n)، التي تملك نواقل شحن حرة أكثر، فإنّ الحقل الكهربائي في الوصلة بين الطبقتين سوف يدفع الالكترونات نحو الطبقة (n) والثقوب نحو الطبقة (P) موجداً بذلك فرقاً في الكمون يُمكن له أن يُولد تيار كهربائي مستمر إذا ما جُهزت دارة خارجية لهذا الغرض.

من أجل توليد الكهرباء من الخلية الشمسية يجب وصل وجهي الخلية العلوي والسفلي إلى وصلتين معدنيتين، حيث تمثّل الوصلة المعدنية العليا (تكون عادةً على شكل شبكة معدنية) القطب السالب والوصلة المعدنية السفلى القطب الموجب. يمكن تخفيض انعكاس الضوء على سطح الخلية العلوي بتوضع تبخيري على ذلك السطح لطبقة رقيقة (طبقة مانعة للانعكاس) مصنوعة من نتريد السيليكون أو ثاني أوكسيد التيتانيوم.

تحدث ضياعات في الخلية الشمسية سببها إعادة الاتحاد (Recombination) والانعكاس والظل على الاتصال الأمامي للخلية. كما أن نسبة كبيرة من الطاقة لأشعة بأطوال موجة طويلة وقصيرة يمكن أن لا تستخدم، بالإضافة إلى أن قسماً من الطاقة غير المستخدمة تمتص وتتحول إلى حرارة.



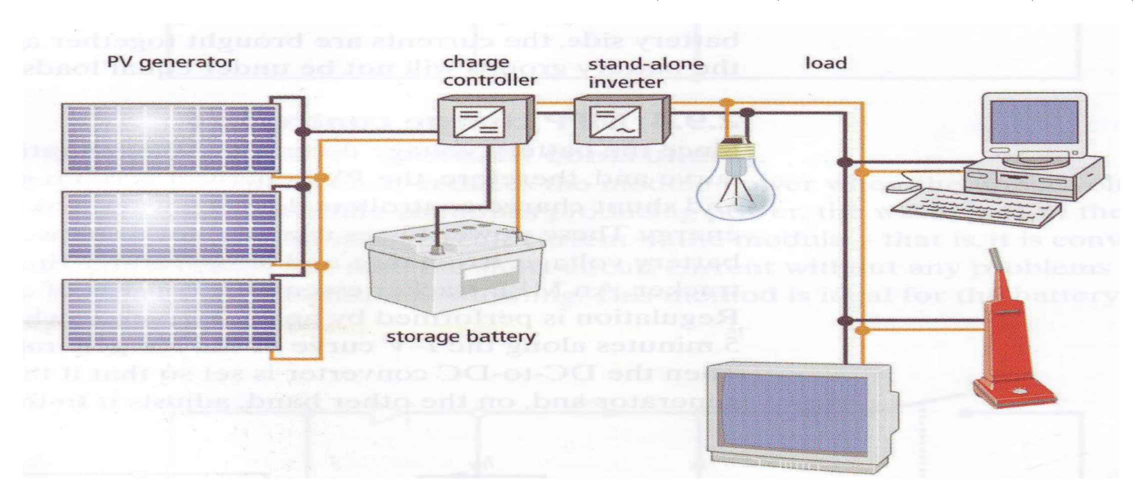
الشكل (2–7) خلية فوتوفولتية مع وجود حمل.[19]

2 – 7 النظام الفوتوفولتي:

هو نظام لتوليد الطاقة الكهربائية شبيه، إلى حد ما، بأي نظام توليد كهربائي من حيث الغاية إلا أنّ الاختلاف يكمن في نوعية المعدات والأجهزة المستخدمة في هذا النظام. لابد من الإشارة إلى أنّ الخلية الشمسية تشكّل الحجر الأساس لبناء النظام الفوتوفولتي، وهناك بعض الإجراءات التي تتم بوصل هذه الخلايا الشمسية مع بعضها كهربائياً إما على التفرع أو على التسلسل لتشكيل ما يسمى باللوح الشمسي (Module) والذي يُعد الأساس لبناء أي نظام فوتوفولتي من الخلايا الشمسية.

2–7–1 مكوّنات النظام الفوتوفولتي:

يتألف النظام الفوتوفولتي، بشكل عام كما في الشكل (2–8)، من: مجموعة ألواح شمسية، أجهزة التنظيم والتحكم، بطاريات التخزين (المدخرات)، القالبات، والحمل.



الشكل (2–8) مكونات النظام الفوتوفولتي.[5]

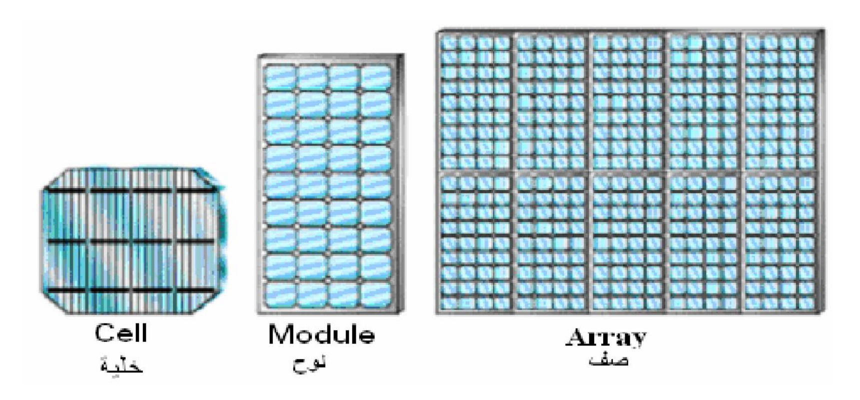
2-7-1-1 اللوح الشمسي (Module)[3]، [17]:

يُعد اللوح الشمسي أو الفوتوفولتي الجزء الأساس للنظام الفوتوفولتي، ويتألف من عدد من الخلايا التي تكون موصولة مع بعضها على التسلسل والتوازي ضمن لوح واحد، ويجب أن تكون محمية من الماء والرطوبة والحرارة. يتم توصيل خلايا الألواح الفوتوفولتية على التسلسل لزيادة جهد خرج النظام، بينما تكون الغاية من الوصل على التوازي لزيادة تيار خرج النظام.

تُوضع الخلايا في غلاف محكم مصنوع من الزجاج المسطّح الذي يصل الإشعاع الشمسي من خلاله إلى هذه الخلايا. يتوجب وضع الألواح في منطقة خالية من ظل الأبنية والأشجار باتجاه الشمس وبزاوية مناسبة، حيث توجّه هذه الألواح بزاوية ميل مناسبة في مواجهة الشمس كي تسقط أشعة الشمس عمودياً عليها فتمتص معظم الطيف الشمسي وتحوّل جزءاً من هذه الإشعاعات إلى طاقة كهربائية يمكن استخدامها في الحال أو تخزينها بدون عمليات وسيطة. فالتشغيل الفعّال للألواح الفوتوفولتية يتطلب تركيبها بزاوية معينة ترتبط بخط العرض للموقع الموجودة فيه، حيث تكون الزاوية في فصل الشتاء هي زاوية خط العرض مضافاً إليها(10^o-15^o)، بينما تكون الزاوية في فصل الصيف هي زاوية خط العرض مطروحاً منها (10^o-15^o).

لقد تمّ مؤخراً صنع ألواح شمسية بقاعدة متحركة تدعى التابعات الشمسية، حيث تتحرك الألواح مع حركة الشمس طيلة النهار، وبحيث تكون أفضل زاوية عندما تسقط أشعة الشمس عمودية على الخلايا طيلة النهار.

يبيّن الشكل (2–9) خلية فوتوفولتية ولوحاً فوتوفولتياً وصفًا فوتوفولتياً.



الشكل (2–9) خلية فوتوفولتية، لوح فوتوفولتي، صف من الألواح الفوتوفولتية [20]

2-7-1-2 أجهزة التنظيم والتحكم:

تستخدم هذه الأجهزة لحماية البطاريات من الشحن والتفريغ الزائد، وتمنع مرور التيار الكهربائي إلى الألواح الفوتوفولتية عند انقطاع الإشعاع الوارد من الشمس، وتعمل أيضاً على تغذية الأحمال من مصادر الطاقة المتاحة سواءً الألواح الفوتوفولتية أو بطاريات التخزين.

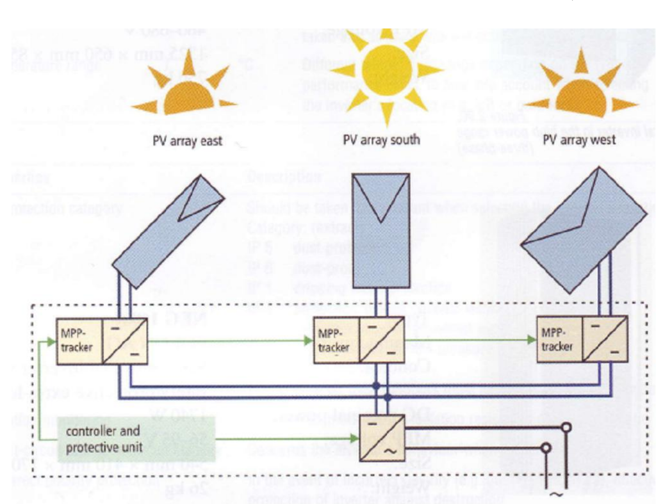
2-7-1-3 بطاريات التخزين (المدخرات):

يُستخدم الألواح الفوتوفولتية لتغذية الأحمال بشكل مباشر، ولكن لابد من وجود أجهزة لتخزين الطاقة لكي تستخدم عند غياب الإشعاع الشمسي وهي عبارة عن بطاريات تخزين أو مدخرات. تُستخدم هذه المدخرات أيضاً من أجل تخزين الفائض من الطاقة وتأمين تغذية كهربائية مستمرة للأجهزة الموصولة مع النظام الفوتوفولتي عند غياب الشمس أو لدى الطقس الغائم.

2-7-1-4 القالبات:

يقدّم النظام الفوتوفولتي، كما هو الحال في البطاريات، تياراً مستمراً تتغذى من خلاله العديد من الأحمال الكهربائية. لكن هناك الكثير من الأحمال التي لا تعمل إلا بالتيار المتناوب، لذلك لابد من إضافة القالبات إلى الأنظمة الفوتوفولتية من أجل تحويل التيار المستمر إلى متناوب.

يوجد ثلاثة أنواع للقالبات وهي: مركزي، شبكي، معياري. لكن أحدث التطورات في تكنولوجيا القالبات هو إنشاء القالب متعدد الأسلاك (الشبكي) كما في الشكل (2-10)، حيث تحتاج القالبات المستخدمة إلى توتر دخل عالي. ففي الأنظمة المظللة أو الأنظمة القابلة للتوجيه يوجد ضياعات طاقية مُعتبرة، لذا يستخدم هذا النوع من القالبات لتقليل هذه الضياعات.



الشكل (2-10) قلاّب متعدد الأسلاك [5]

2 – 8 أنواع الخلايا الفوتوفولتية [5]:

2 – 8 – 1 الخلايا السيليكونية:

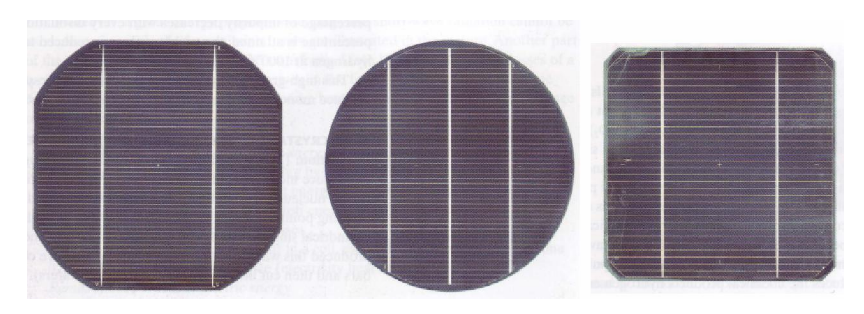
يمكن التمييز بين نماذج مختلفة للخلايا السيليكونية وهي:

أ- الخلايا السيليكونية الأحادية البلورات(MONOCRYSTALLINE SILICON CELLS):

تبلغ كفاءة معظم الخلايا السليكونية الأحادية البلورية المتوفرة في الأسواق حوالي15% أو أكثر بقليل، حيث أن الكفاءة هي النسبة المئوية من الطاقة الشمسية الساقطة على اللوح الفوتوفولتي التي يتم

تحويلها إلى كهرباء. وبالرغم من ميزة الكفاءة العالية التي تمتاز بها الخلية السيليكونية الأحادية البلورة، فإن سعرها مرتفع جدًا لكونها مصنعة من سليكون أحادي البلورة عالي النقاوة وهذا يتطلب طريقة في التصنيع عالية التكاليف وتحتاج إلى عمال ذوي كفاءة وخبرة عالية.

يمكن لهذا النوع من الخلايا أن يأخذ أشكال متعددة (مربع، دائري، مثمن،.....الخ) كما في الشكل (2−11)، حيث تكون أبعادها(100mm×100mm) إلى (125mm×125mm) وتكون الدائرية منها بأقطار تتراوح بين (100 −150 mm)، أما سماكة هذه الخلايا فهي حوالي (0.3 mm). تُعدُّ هذه الخلايا من النوع المتجانس التركيب، أما ألوانها فيمكن أن تكون أزرق غامق إلى أسود إذا كانت مع طبقة مانعة للانعكاس وقد يكون لونها رمادياً إذا كانت بدون طبقة مانعة للانعكاس.



الشكل (2−11) خلايا سيليكونية أحادية البلورة بأشكال مختلفة.

أما الشكل (2−12) فيظهر لوحاً شمسياً مصنوعاً من خلايا سيليكونية أحادية البلورية.



الشكل (2−12) لوح فوتوفولتي مكوّن من عدد من الخلايا السيليكونية الأحادية البلورة.[20]

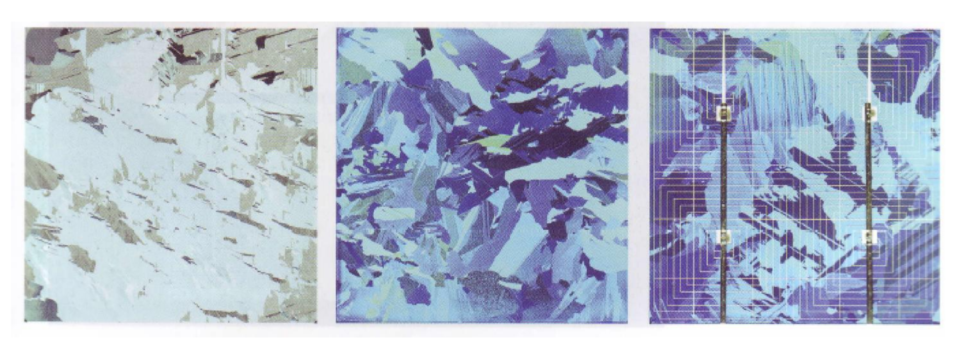
ب- الخلايا السيليكونية المتعددة البلورات (POLYCRYSTALLINE SILICON CELLS):

يُعدُّ هذا النوع من الخلايا السيليكونية أقل كفاءةً من النوع الأحادي البلورة، حيث يمكن للكفاءة أن تصل إلى 12% أو أكثر بقليل. ولكن يمتاز هذا النوع بأنه أقل ثمناً وأسهل تصنيعاً بسبب النقاوة الأقل للمادة الأولية. تعود الكفاءة الأقل في هذه الحالة إلى إمكانية تجمّع حوامل الشحن (الالكترونات والثقوب)، المتشكّلة نتيجة طاقة الفوتونات الضوئية الساقطة على الخلية، على الحدود بين الحبيبات داخل السيليكون المتعدد البلورات. يمكن للكفاءة أن تتحسن بتصنيع المادة بطريقة تكون فيها الحبيبات كبيرة الحجم، ويتم ذلك بتبريد

السليكون المذاب ببطء ثم توجه الخلايا من الأعلى إلى الأسفل وذلك للسماح للإشعاع الشمسي بالتغلغل بعمق خلال الحبيبات.

إنّ الشكل الأكثر مصادفةً لهذا النوع من الخلايا هو الشكل المربع، حيث تتراوح أبعاد الخلية بين (100mm×100mm) إلى (150mm×150mm) وسماكتها تكون حوالي (0.3 mm). تكون تركيبة هذه الخلايا عبارة عن بلورات باتجاهات مختلفة، أما الألوان المألوفة لهذه الخلايا فهي الأزرق إذا كانت الخلية تحوي على طبقة مانعة للانعكاس و الفضي الرمادي إذا كانت غير حاوية على طبقة مانعة للانعكاس.

يُظهر الشكل (2–13) أنواع مختلفة من الخلايا السيليكونية المتعددة البلورات، كما أنّ الشكل (2–14) يُظهر لوحاً فوتوفولتياً مكوّناً من مجموعة من الخلايا السيليكونية المتعددة البلورات.



الشكل (2–13) نماذج من خلايا سيليكونية متعددة البلورات (مع وبدون طبقة مانعة للانعكاس).



الشكل (2–14) لوح فوتوفولتي مكوّن من عدد من الخلايا السيليكونية المتعددة البلورات [20]

ت- الخلايا السيليكونية اللابلورية (AMORPHOUS SILICON CELLS):

يُعدّ السيليكون غير المتبلور مادة غير منتظمة البنية البلورية (أقل ترتيباً من النوع البلوري)، حيث لا ترتبط كل ذرة ارتباطًا كاملاً مع الذرات المجاورة وإنما تترك ما يسمى بالرباط المتدلي فتتشكّل شبكة غير منتظمة. تتميز هذه الخلايا بسعرها المنخفض مقارنةً بالخلايا السيليكونية الأحادية والمتعددة البلورات، ولكن كفاءتها منخفضة بالمقارنة مع الأنواع السابقة حيث لا تتجاوز كفاءة اللوح من هذا النوع 8%.

يصل البعد الأعظمي للوح من هذا النوع من الخلايا (2,44 m×0,77 m)، وتتميز الخلايا من هذا النوع ببنيتها المتجانسة ولونها يكون بني محمر إلى أسود.

يظهر الشكل (2–15) لوح فوتوفولتي من خلايا سيليكونية لابلورية.



الشكل (2 – 15) لوح فوتوفولتي مكوّن من خلايا سيليكونية لابلورية

ث– الخلايا السيليكونية الشريطية:

يتم في هذه الطريقة إنتاج شريط من السليكون الأحادي البلورة باستخدام سليكون متعدد البلورة أو من سليكون أحادي مذاب.

2– 8 –2 الخلايا ذات الطبقات الرقيقة (Thin-film cells):

يتصف هذا النوع من الخلايا بتطبيق المواد النصف ناقلة كطبقات رقيقة على مادة ما (الزجاج في معظم الحالات)، وتكون الإجراءات المستخدمة لذلك متعددة مثل: التوضع التبخيري، التحليل الكهربائي، البخ،....الخ. أما المواد النصف ناقلة التي يمكن استخدامها كطبقات رقيقة فيمكن أن تكون السيليكون اللابلوري، الكادميوم – التولورايد (CdTe) وغيرها من المواد.

بسبب الامتصاصية العالية للضوء من قبل هذه المواد تكون سماكة هذه المواد أقل من (0,001 mm)، حيث تكون هذه السماكة كافية نظرياً لتحويل الضوء إلى كهرباء. تكون المواد المستخدمة ذات قابلية جيدة لإشابتها بذرات غريبة. بمقارنة هذه الخلايا مع الخلايا السيليكونية البلوريّة والتي تحتاج في تصنيعها لدرجات حرارة أعلى من (1500°C) فإن خلايا الطبقات الرقيقة تحتاج في إجراءات الحصول عليها لدرجات حرارة أخفض تتراوح ضمن المجال (200-500°C)، و من ثمّ فهي أقل استهلاكاً للطاقة وللمواد من الخلايا السيليكونية البلورية.

سنذكر من هذه الخلايا مايأتي:

a) **خلايا الغاليوم أرسنايد Ga As:** يُعد الغاليوم ارسنايد ملائم جداً للاستخدام في تطبيقات الخلايا الشمسية لكونها ذات معامل امتصاص عال للضوء. يتميز هذا النوع من الخلايا بكفاءة جيدة،

وبإمكانية العمل تحت ظروف درجة حرارة عالية نوعاً ما بدون تناقص في أدائها كالخلايا السليكونية وبعض أشباه النواقل التي تعاني من هذه المشكلة.

b) خلايا الكادميوم تولورايد (CdTe):

الكادميوم و التولورايد هي مواد من أشباه النواقل مناسبة للاستخدام في الخلايا الفوتوفولتية. تتميز الخلايا المصنّعة من هذه المواد بإمكانية تصنيعها باستخدام عملية بسيطة ورخيصة من الطلاء الكهربائي. تصل كفاءة هذه الخلايا إلى (10%) بدون تناقص عند الاستخدام. لكن من مساوئها أن الكادميوم مادة سامة جدًا.

c) خلايا الكوبر انديوم ديسلنايد(CI S) :

هي مواد مصنعة من أنصاف النواقل مركبة من النحاس و الأنديوم و الديسلينايد وقد استخدمت في تصنيع خلايا وصلت كفاءتها مخبرياً إلى (12%)

2–9 الخواص الكهربائية للخلايا الشمسية [5] :

2–9–1 مواصفات الخرج للخلية الشمسية[5]:

تحدد بشكل اعتيادي مواصفات الخرج لخلية شمسية والتي يمثلها الشكل (2–20) بما يأتي:

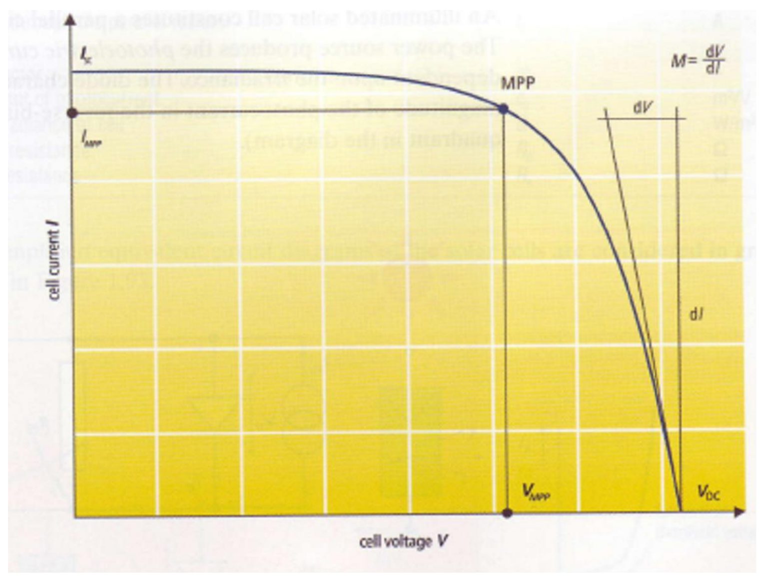
أ– **تيار دارة القصر (I_{SC})**: وهو التيار الأعظمي الذي تستطيع الخلية الشمسية توليده من الإشعاع الشمسي ويسمى بتيار القصر، ويمر هذا التيار إلى دارة خارجية بدون حمل أو مقاومة ($V = 0$).

ب– **جهد الدارة المفتوحة (V_{OC})**: هو الجهد الأعظمي الذي تعطيه الخلية الشمسية من الإشعاع الشمسي ونحصل عليه عندما لا يمر أي تيار في الدارة ($I=0$).

ت– **نقطة الاستطاعة الأعظمية للخلية (MPP):** هي النقطة على منحني المواصفات للخلية والتي تعمل عندها هذه الخلية باستطاعتها العظمى، حيث تكون قيم كل من استطاعة الخلية والتيار والجهد الموافقين لهذه النقطة محددة (P_{MPP})، (I_{MPP})، (V_{MPP}). يمكن تحديد هذه النقطة عند ظروف عمل متغيرة للخلية ويتم ذلك من خلال تحديد المشتق (M) على منحني المواصفات (انظر الشكل 2–20) كما يأتي:

$$M = \frac{\partial V}{\partial I} = tg\,\varphi \approx \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad (1 - 2)$$

و من ثمّ توجد نقطة الاستطاعة الأعظمية على منحني المواصفات عند النقطة التي يكون فيها المشتق (M) مساوياً للواحد.

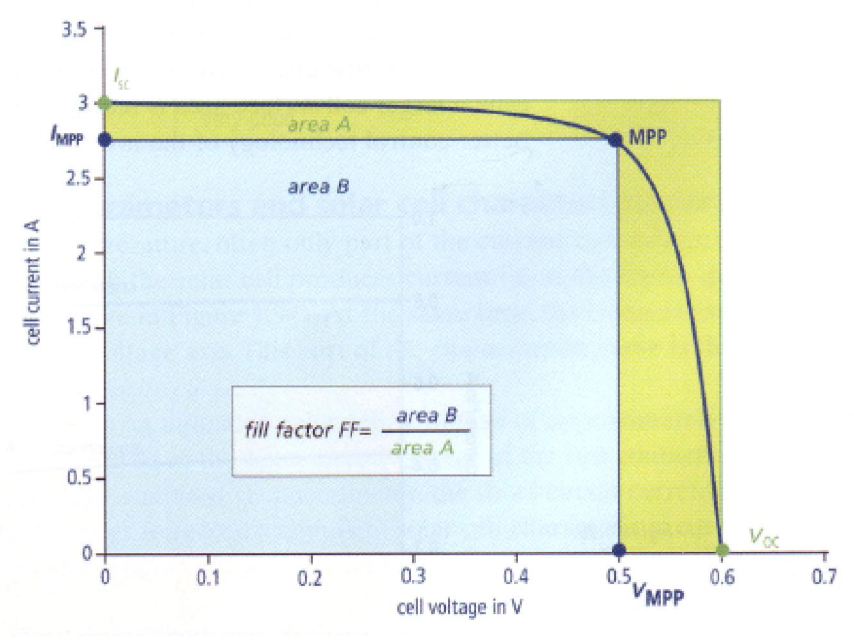


الشكل (2 – 16) المنحني المميز (I - V) لخلية فوتوفولتية مثالية.[5]

كما أن هناك ما يسمى **بعامل الملء (FF)** في الخلية الشمسية والذي يصف نوعيّة الخلية، حيث يعطى بالنسبة بين استطاعة النقطة الأعظمية (P_{MPP}) إلى الاستطاعة الأعظمية النظرية كما في العلاقة الآتية:

$$FF = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{Isc \times Voc} = \frac{P_{MPP}}{Isc \times Voc} \qquad (2\text{-}2)$$

تكون قيمة هذا العامل ضمن المجال (0.75–0.85) في الخلايا الشمسية البلورية، وفي الخلايا اللابلورية تكون القيمة لهذا العامل ضمن المجال (0.5–0.7). يمكن تحديد عامل الملء تخطيطياً بالنسبة بين المساحة (B) إلى المساحة (A) كما في الشكل (2–21).



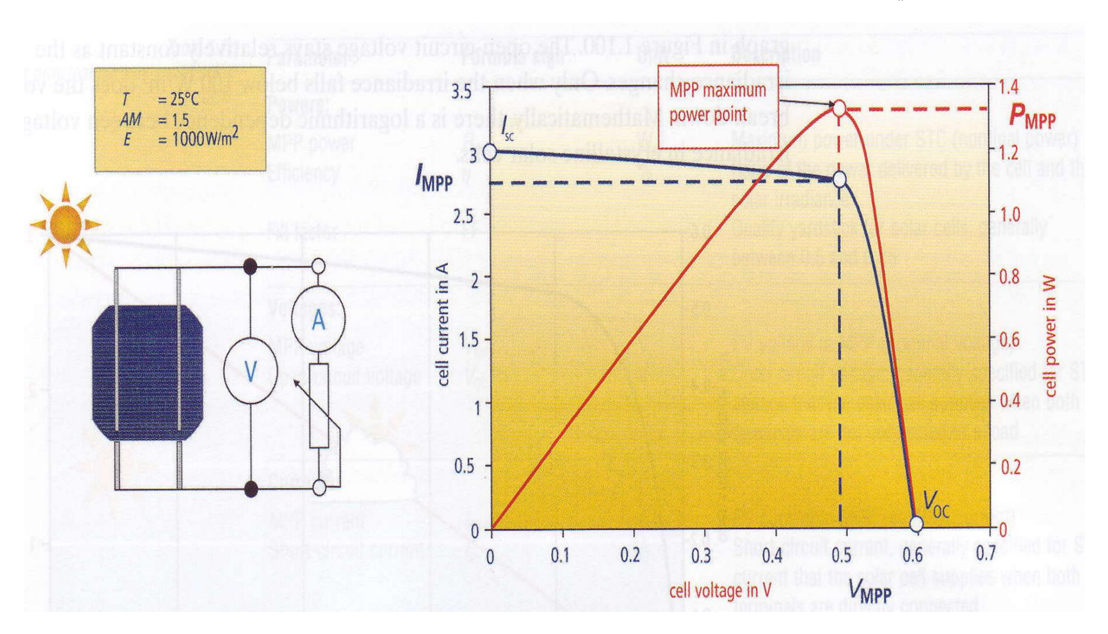
الشكل (2 – 17) التحديد التخطيطي لعامل الملء لخلية شمسية.[5]

2–9–2 شروط الاختبار القياسي للخلايا الشمسية (STC):[5]

بغية المقارنة بين عدة نماذج من خلايا شمسية (فوتوفولتية)، فقد تمّ تحديد شروط موحدة لتحديد المعطيات الكهربائية والتي يكون عندها منحني المواصفات للخلية محدداً. ترتبط هذه الشروط القياسية بالنظام القياسي IEC 60904 وهذه الشروط هي:

- الإشعاع الشمسي $G=1000W/m^2$.
- درجة حرارة الخلية $T = 25°C$
- طيف الضوء المحدد بكتلة هواء قدرها AM=1.5 (وهو التوزع الطيفي للإشعاع الشمسي المرجعي حسب النظام 3 -IEC 60904).

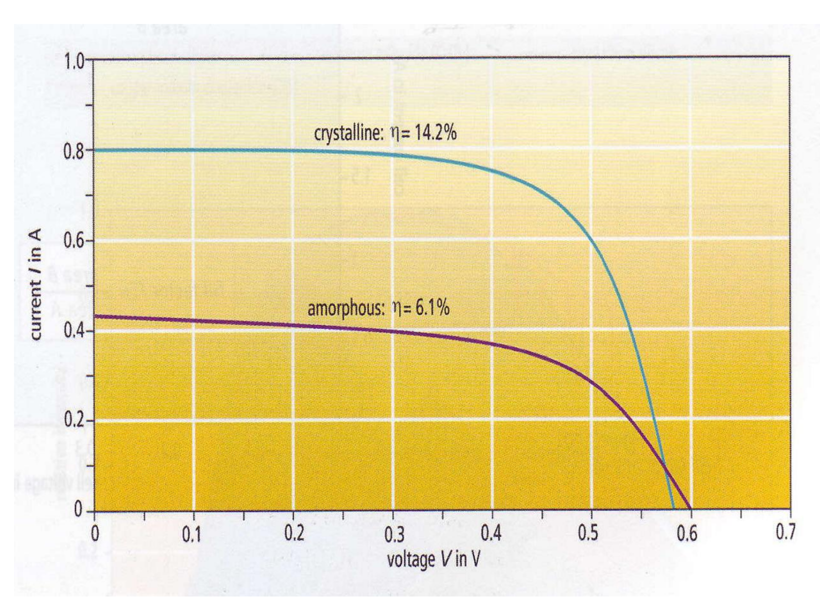
تكون المواصفات على المنحني المميز كما في الشكل (2–22) هي: نقطة القدرة الأعظمية للخليــة (MPP) وتعطى بالواط ، تيار دارة القصر (I_{SC}) ويكون أعلى بحدود (15%–5%) من تيار النقطة (MPP) وتكون قيمة هذا التيار تحت الشروط السابقة لخلية بلورية قياسية بأبعاد (100 mm X 100 mm) هــو حــوالي 3 أمبير. أما جهد الدارة المفتوحة (V_{OC}) فيكون تحت نفس الشروط من أجل الخلايــا البلوريــة (0,5-0,6v) وللخلايا اللابلورية حوالي (0.6–0.9 V).



الشكل (2 – 18) منحنيات المواصفات المميزة (I–V–P) لخلية شمسية سيليكونية بلورية عند عمل الخلية بالشروط (STC) .[5]

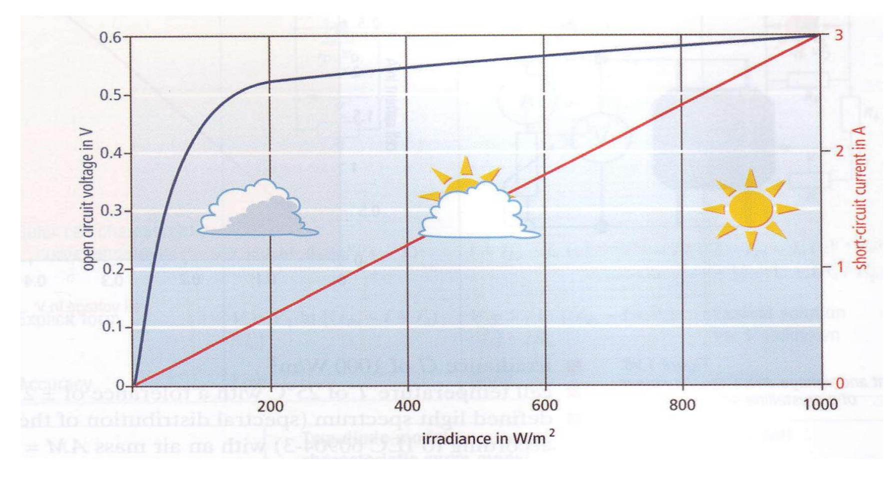
قد تختلف البارمترات والمنحنيات المميزة للخلايا ذات الطبقات الرقيقة عنها في الخلايا السيليكونية البلورية، ففي الخلايا اللابلورية تكون النقطة (Mpp) عند جهد مساوي لــ0.4V ومجمل منحني المواصفات يكون أكثر انبساطاً كما في الشكل (2– 23).

من أجل تحقيق نفس الاستطاعة في الخلايا اللابلورية كما في الخلايا البلورية يتطلب ذلك مساحة سطح من الخلايا أكبر وتحكم أكبر بالإشعاع الشمسي، كما نلاحظ أنه في الخلايا البلورية تكون شدة التيار والمردود أكبر منه في الخلايا اللابلورية.



الشكل (2 – 19) مقارنة بين المنحنيات المميزة لخلية سيليكونية بلورية وأخرى غير بلورية عند شدة إشعاع شمسي قدرها $1000W/m^2$ ومساحة سطح خلية قدرها (5 cm × 5 cm) ودرجة حرارة قدرها 28 °C.[5]

يُظهر الشكل (2–24) أنّ تيار القصر يعتمد بشكل خطي على شدة الإشعاع فإذا تضاعف شدة الإشعاع الشمسي تضاعفت قيمة التيار. أما توتر الدارة المفتوحة فيبقى ثابت نسبياً عندما تتغير شدة الإشعاع الشمسي، إلا عندما تهبط قيمة الإشعاع الشمسي إلا ما دون $100\ W/m^2$ فعندها فقط تهبط قيمة الجهد بشكل ملحوظ.



الشكل (2 – 20)علاقة تيار دارة القصر وتوتر الدارة المفتوحة بشدة الإشعاع الشمسي [5]

2– 9–3 مردود الخلايا الفوتوفولتية[5] :

يعرّف مردود الخلية الفوتوفولتية بأنّه النسبة بين الطاقة المنتجة بوساطة الخلية عند نقطة الطاقة الأعظميّة وبين طاقة الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية أي:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \times G} = \frac{FF \times Voc \times Isc}{A \times G} \qquad (3\text{-}2)$$

حيث إنّ:

FF:عامل الملء للخلية الشمسية

P_{Mpp}: استطاعة النقطة العظمى

V_{oc}: توتر الدارة المفتوحة

I_{sc}: تيار دارة القصر

A: مساحة سطح الخلية

G: الاشعاع الشمسي

تمثل (A) في علاقة المردود السابقة من أجل اللوح الفوتوفولتي، مساحة اللوح.

يتم تحديد المردود دائماً على لوحات المعطيات (المردود الاسمي) للخلايا والألواح تحت شروط الاختبار القياسية (STC) أي: $\eta_n = \eta_{stc}$، و من ثمّ يكون المردود الاسمي هو:

$$\eta_n = \frac{P_{MPP(STC)}}{A \times 1000 \;\; W/m^2} \qquad (4\text{-}2)$$

يعتمد مردود الخلايا الشمسية على شدة الإشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة. فالمردود عند شدة إشعاع شمسي أو درجة حرارة خاصة هو حاصل المردود الاسمي مطروحاً منه التغير في المردود أي:

$$\eta = \eta_n - \Delta\eta \qquad (5\text{-}2)$$

يمكن حساب التغير في المردود بدلالة معامل الإشعاع الشمسي (S)، حيث يعطى هذا المعامل بالنسبة بين شدة الإشعاع الشمسي إلى شدة الإشعاع الشمسي عند شروط الاختبار القياسية ($S = \frac{G}{1000 \;\; W/m^2}$) فتكون العلاقة التقريبية لتغير المردود لخلية بلورية عند درجة حرارة ثابتة هي :

$$\Delta\eta \approx -0.04\,\% \times \eta_n \times \ln(S) \qquad (6\text{-}2)$$

ينقص مردود الخلايا الشمسية مع ارتفاع درجة الحرارة أي يمكن أن يصل إلى أعلى مستوياته عند أخفض درجة حرارة للخلية، و من ثمّ تنخفض استطاعة الخلايا السيلكونية بمقدار (% 0.45) لكل درجة مئوية، و من ثمّ يمكن حساب التغير في المردود بالعلاقة:

$$\Delta\eta = -0.45\,\%(25\,^{\circ}c - T_{mod}) \times \eta n \qquad (7\text{-}2)$$

حيث T_{mod}: درجة حرارة الخلية الشمسية

يعتمد معامل درجة الحرارة على شدة الإشعاع الشمسي، فعند شدة إشعاع منخفض يكون الانخفاض في قدرة الخلية نتيجة التأثير غير المرتفع كثيراً لدرجة الحرارة في الخلايا البلورية (عند $100\ W/m^2$ ينخفض فقط 0.15 %)، أما من أجل الخلايا غير المتبلورة فإن معامل درجة حرارة القدرة يرتفع فعلياً عند الإشعاع المنخفض (يزداد بمعدل 1.4 % لكل درجة مئوية).

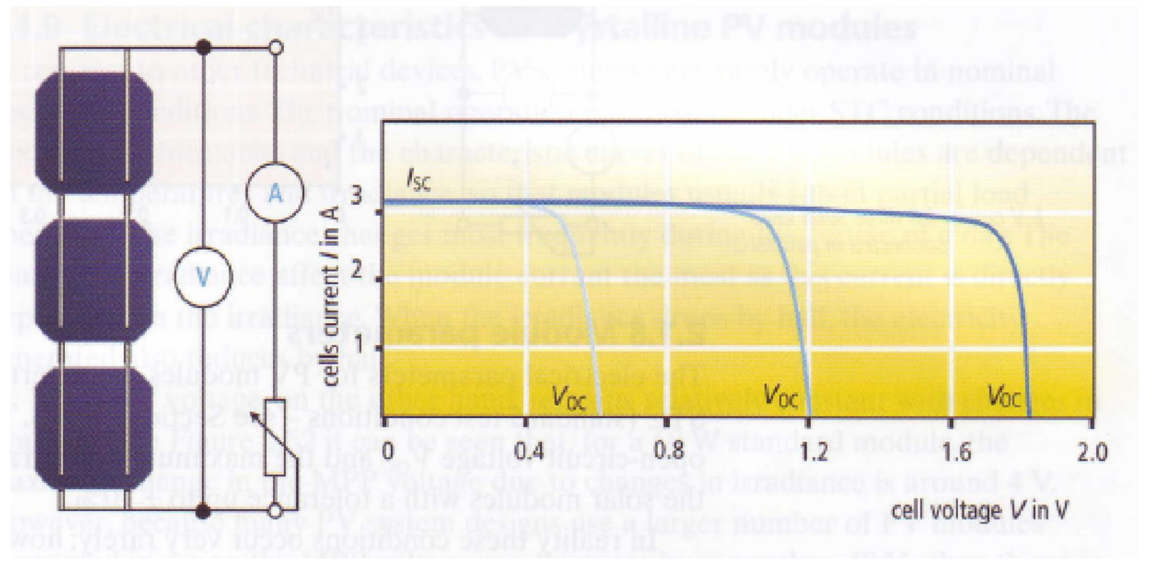
يُعد مردود التحويل للخلية الشمسية منخفض إذا ما قُورن بمراديد مصادر التحويل الأخرى، إلا أنه ينبغي أن نشير أن:

- الخلية الشمسية تستخدم مصدراً مجانياً للطاقة.
- في المحطات البخاريّة عندما نحصل على مردود 38% فهذا يعني أننا نهدر 62% من الوقود الثمين.
- الخلية الشمسية لا تشكل تلوثاً حرارياً أو كيماوياً للجو فهي صديقة للبيئة.

2–10 مواصفات الألواح الفوتوفولتية: [5]

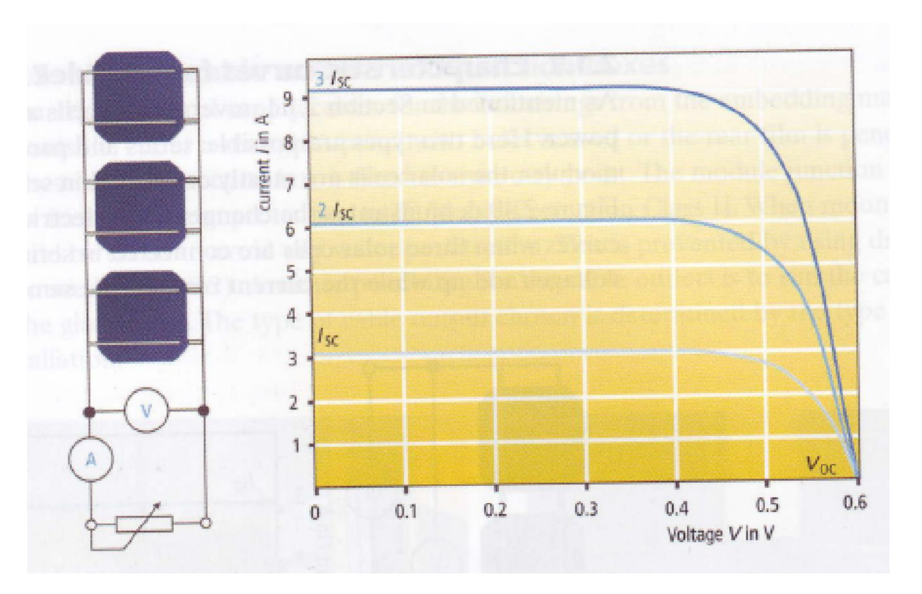
2–10–1 منحنيات المواصفات (المنحنيات المميزة) للألواح الفوتوفولتية:

يتم في الغالب وصل الخلايا الفوتوفولتية مع بعضها على التسلسل لخلق جهد أكبر. يظهر الشكل (2–25) التغير في البارامترات الكهربائية ومنحنيات المواصفات عندما يتم وصل ثلاث خلايا على التسلسل، حيث يظهر أن جهد الخلايا يضاف إلى بعضها بعضاً بينما يبقى التيار نفسه للخلايا كلها.



الشكل (2 – 21) منحنيات (V – I) لثلاثة خلايا فوتوفولتية موصولة على التسلسل. [5]

أما وصل الخلايا على التفرع أو التوازي فيبقى قيمة الجهد ثابتاً للخلايا جميعها، بينما يضاف تيار كل خلية إلى الأخرى كما في الشكل (2–26).

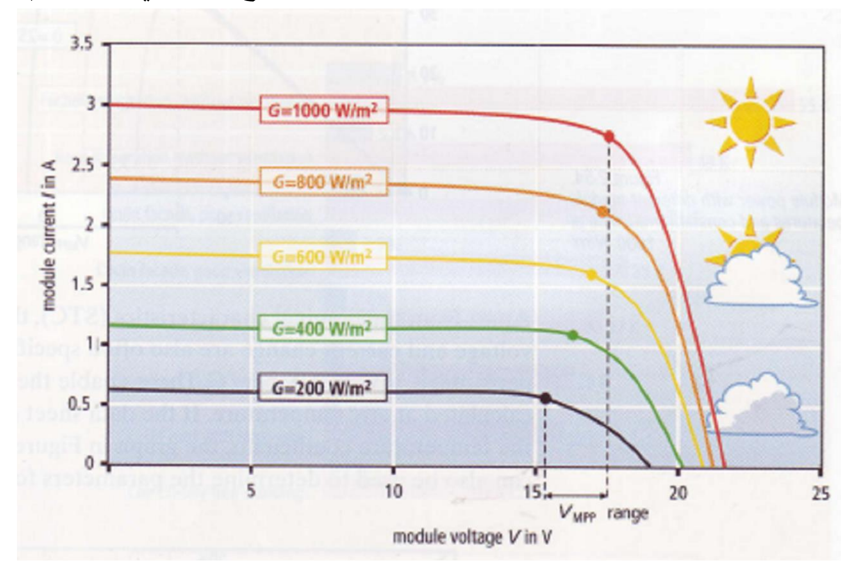


الشكل (2 – 22) منحنيات (V – I) لثلاثة خلايا فوتوفولتية موصولة على التفرع.

2–10–2 المواصفات الكهربائية للألواح الفوتوفولتية البلورية [5]:

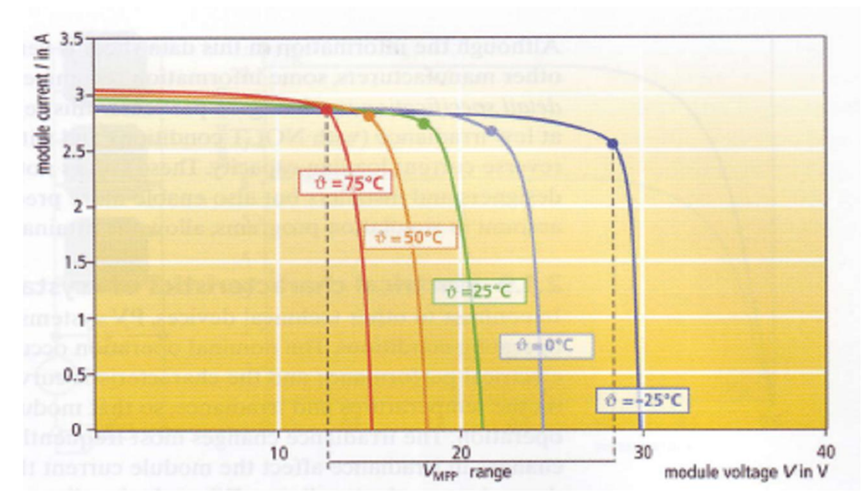
إنّ الأنظمة الفوتوفولتية لاتعمل إلا نادراً عند ظروف التشغيل الاسمية التي تحدث فقط عند شروط الاختبار القياسية. تعتمد الكفاءة الكهربائية ومنحنيات المواصفات للألواح الفوتوفوليتة على درجات الحرارة للوح وعلى شدة الإشعاع الشمسي، لذلك تعمل الألواح بشكلٍ اعتيادي عند تشغيل بحمل جزئي.

يؤدي تغير شدة الإشعاع الشمسي على مدار النهار إلى التأثير بشكل أساس على تيار اللوح، فعندما تنخفض شدة الإشعاع الشمسي إلى النصف فإن الكهرباء المتولدة تنخفض إلى النصف أيضاً. أما جهد نقطة الاستطاعة العظمى (Mpp) فيبقى ثابتاً نسبياً عند التغير في شدة الإشعاع الشمسي، حيث يظهر الشكل (2–27) أنّ التغير في جهد نقطة الاستطاعة العظمى نتيجة تغيّر شدة الإشعاع الشمسي هو حوالي (4V). لكن في بعض تصاميم الأنظمة الفوتوفولتية التي تستخدم عدد كبير من الألواح الموصولة على التسلسل فيمكن لجهد نقطة الاستطاعة العظمى أن يتغير عند تغير شدة الإشعاع الشمسي بحدود (40 V).



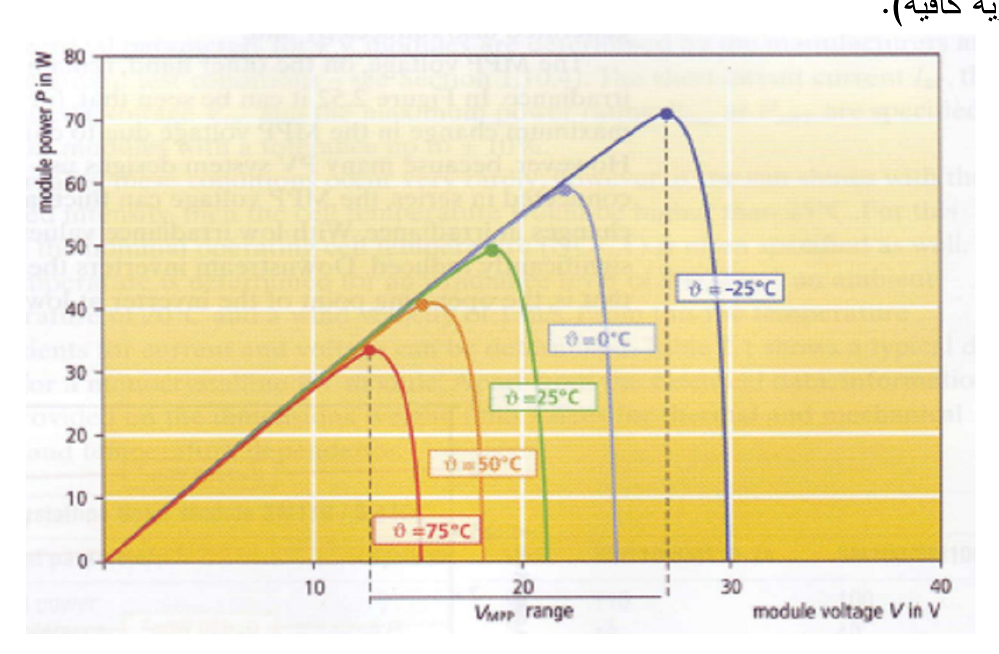
الشكل (2 – 23) منحنيات (V – I) للوح فوتوفولتي عند شدة إشعاع شمسي متغيرة ودرجة حرارة ثابتة.[5]

يتأثر جهد اللوح الشمسي بدرجة حرارة اللوح، فيمكن لجهد لوح مهوّى باستطاعة (50W) عند شروط الاختبار القياسية أن يتغير بين (8V) في الصيف و (10V) في الشتاء ويحدد جهد اللوح جهد النظام بأكمله و من ثمّ يؤثر على تصميم هذا النظام. أما التيار فيتغير بشكل خفيف مع تغير درجة حرارة اللوح، حيث يزداد بشكل خفيف مع ازدياد درجة الحرارة كما في الشكل (2 – 28).



الشكل (2 – 24) منحنيات (V – I) للوح فوتوفولتي عند شدة إشعاع شمسي ثابتة 1000 W/m^2 ودرجة حرارة متغيرة.[5]

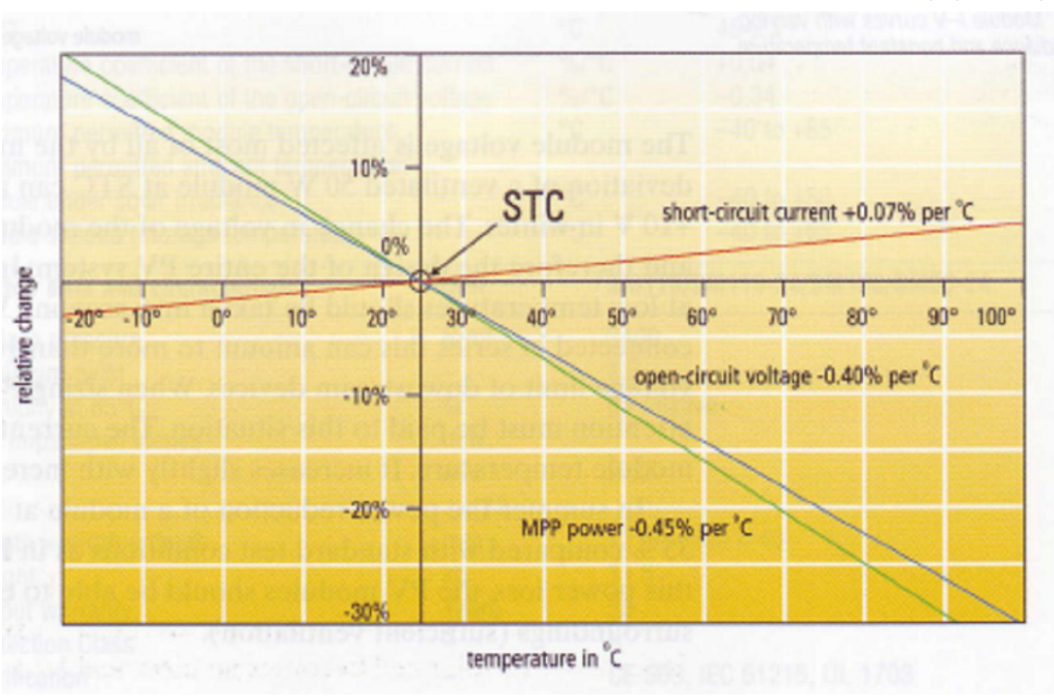
يمكن أن يصل الانخفاض في قدرة اللوح الفوتوفولتي عند درجات حرارة عالية في فصل الصيف إلى (35%)بالمقارنة مع الاستطاعة عند شروط الاختبار القياسية كما في الشكل (2–29). لذلك من أجل التخفيف من ضياع القدرة للوح، فيجب على اللوح أن يكون قادراً على بعث الحرارة بسهولة إلى الوسط المحيط (تهوية كافية).



الشكل (2 – 25) الاستطاعة للوح فوتوفولتي عند شدة إشعاع شمسي ثابتة 1000 w/m^2 ودرجة حرارة متغيرة.[5]

يتم بشكل اعتيادي تحديد معاملات درجة الحرارة من أجل تغيرات الجهد والتيار كنسبة مئوية على لوحة المعطيات الاسمية للوح الفوتوفولتي بـــ (mV, mA) لكل (1°C) وهذا يمكّن من حساب الفعّالية (الأداء)

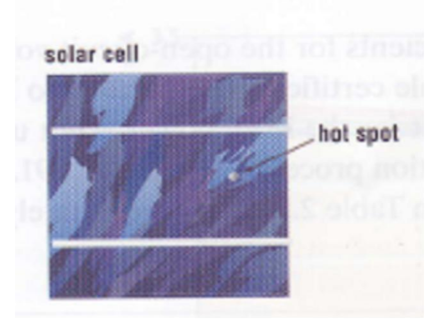
الكهربائي عند أية درجة حرارة. أما إذا لم تعطى أية معلومات عن ذلك فيمكن الاستعانة بالمخطط المبيّن في الشكل (2–30) والذي يخص الألواح السيليكونية البلورية ويمكن استخدامه أيضاً لتحديد البارامترات عند أية درجة حرارة.



الشكل (2–26) اعتماد الخواص الكهربائية للألواح الفوتوفولتية على درجة حرارتها.[5]

2–10–3 مفهوم النقطة الحارة، تحويلة الديود، التظليل:[5]

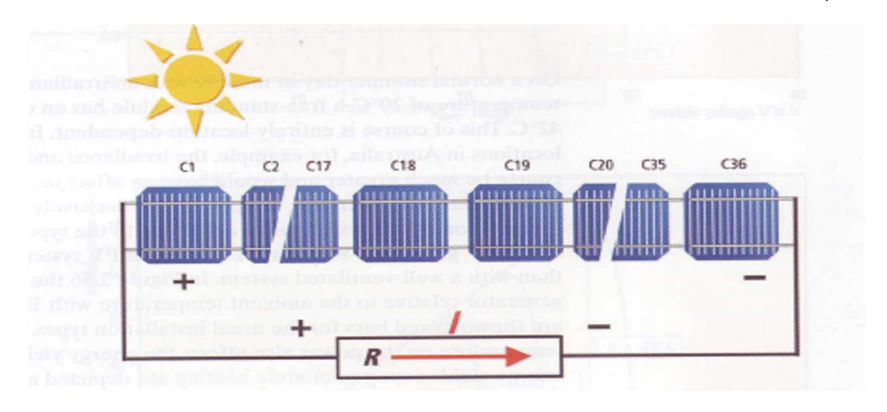
يمكن للخلايا المظللة تحت ظروف عمل معينة أن تسخن لتصل إلى حد تؤذي به مواد الخلية نفسها، و من ثمّ يظهر ما يسمى بالبقعة أو النقطة الحارة (hot spot)، كما في الشكل (2–31). يمكن لذلك أن يحدث لحظياً عندما يجري تيار معكوس عالٍ عبر خلية شمسية غير مضاءة(وغير محمية بديودات مناسبة).



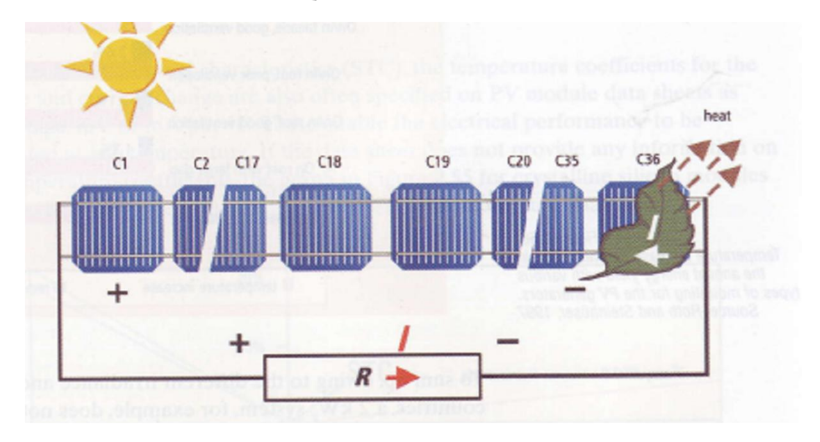
الشكل (2– 27) خلية شمسية تظهر وجود نقطة حارة.

لتوضيح مفهوم النقطة الحارة بشكل أكبر سنعتبر وجود لوح فوتوفولتي يخضع إلى شروط تشغيل طبيعية كما في الشكل (2–32)، حيث يتم استخدام التيار المتولد بوساطة حمل (مقاومة R). فإذا غطى شيء ما (ورقة شجرة مثلاً) خلية ما من خلايا اللوح (انظر الشكل 2 –33) فعندها تصبح هذه الخلية مظلمة وتسلك سلوك حمل كهربائي وعندها لن يتولد تيار في تلك الخلية بل ستستخدم التيار من الخلايا المجاورة (اتجاه

تيار معكوس) أي أن تيار الخلايا المضاءة سيجري عبر هذه الخلية المظلمة والذي سيتحوّل إلى حرارة. فإذا كان التيار الجاري كبير بما فيه الكفاية فهذا سيقود إلى الأثر المسمى بالنقطة الساخنة.

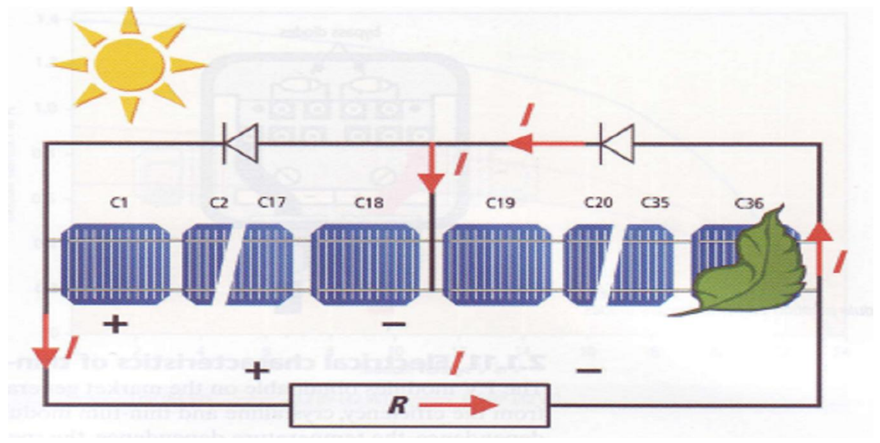


الشكل (2−28) لوح فوتوفولتي مع وجود حمل.



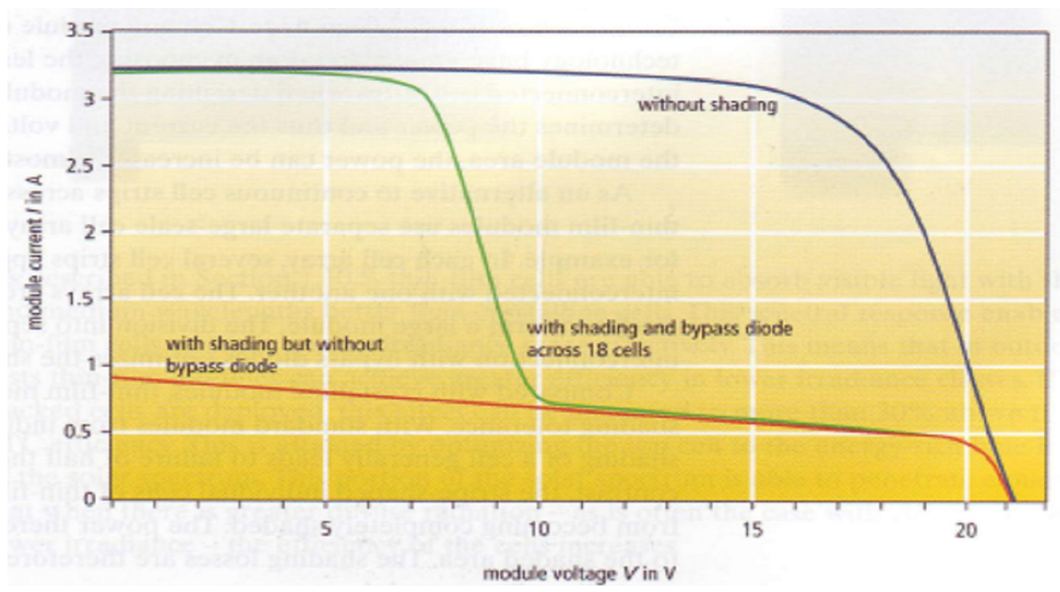
الشكل (2−29) لوح فوتوفولتي مع وجود خلية مظللة وبدون تحويلة ديود.

يمكن منع النقطة الساخنة من الحصول بتحويل التيار المعكوس بعيداً عن الخلايا الشمسية بوساطة تحويلة (bypass) مزودة بديود يمنع الجهود الكبيرة من أن تتولد عبر الخلايا الشمسية في الاتجاه المنحرف المعكوس. توصل تحويلة الديود بشكل اعتيادي بين كل 18− 20 خلية من خلايا اللوح الفوتوفولتي، أي أن لوحاً يحوي على 36 - 40 خلية يحتاج إلى وصلتين ديود كما في الشكل (2− 34).



الشكل (2− 30) لوح فوتوفولتي مع وجود جزء مظلل وتحويلتي ديود.[5]

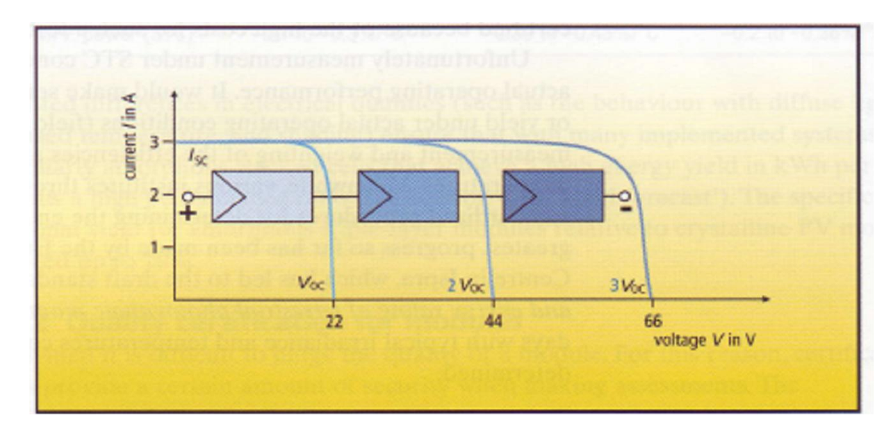
يتغير المنحني المميز للوح بسبب وجود الجزء المغطى وكذلك بسبب وجود التحويلة كما في الشكل(2–35) حيث يعبّر المنحني العلوي عن المنحني المميز الاعتيادي للوح السابق المكوّن من 36 خلية تحت شروط الاختبار القياسية (STC)، أما المنحني السفلي فيعبّر عن المنحني المميز في حال وجود جزء مظلل بنسبة 75% ولكن بدون وجود تحويلة ديود فعندها سيذهب كل التيار الناتج عن الخلايا إلى الخلية المظللة. بينما يظهر المنحني الأوسط المنحني المميز للوح مظلل مع وجود تحويلة ديود لكل 18 خلية تقريباً، حيث نلاحظ أن جهد نقطة الاستطاعة العظمى (V_{Mpp}) ينخفض إلى حوالي النصف ولكن نكون قد ضمنا مرور التيار عبر 18 خلية مكشوفة على الأقل.



الشكل (2– 31) المنحنيات المميزة (I – V) للوح فوتوفولتي بوجود وبعدم وجود تحويلة ديود.

2–10–4 وصل الألواح الفوتوفولتية:[5]

يمكن للألواح الفوتوفولتية أن توصل مع بعضها البعض على التسلسل أو التفرع للحصول على طاقات كهربائية مناسبة وهي ما يسمى بالمولّد الفوتوفولتي. لتجنب ضياعات الطاقة في النظام الإجمالي يجب أن تكون الألواح الموصولة مع بعضها من النموذج نفسه يظهر الشكل (2–36) المنحني المميز منحني(I –V) لثلاثة ألواح موصولة على التسلسل.



الشكل(2–32) منحني (I-V) لثلاثة ألواح فوتوفولتية موصولة على التسلسل.

في الحالة المثالية عند ربط (n) لوح فوتوفولتي متماثل على التسلسل، فإنّ جهد الدارة المفتوحة للنظام يساوي جهد الدارة المفتوحة للوح واحد مضروبًا بعدد الألواح كما في العلاقة الآتية[21]:

$$Vsg = n \cdot Voc1 = n \cdot Voc2 = n \cdot Voc3 = ---- = n \cdot Vocn \rightarrow (I = 0) \qquad (8 - 2)$$

أما عندما يكون التيار ($I > 0$) أي عند وجود حمل كهربائي فإن:

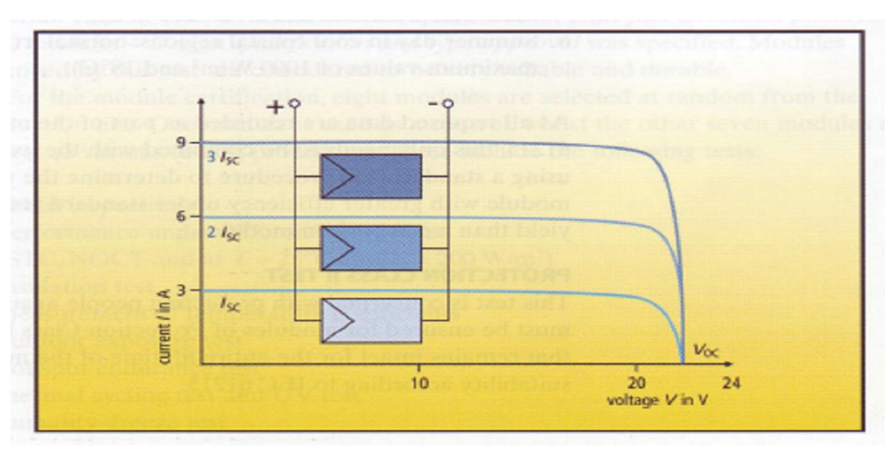
$$Vsg = \sum_{1}^{n} Vn = V1 + V2 + V3 + ----- + Vn \rightarrow (I > 0) \qquad (9 - 2)$$

يمكن وصل الألواح الفوتوفولتية أيضاً على التفرع، ففي حال ربط عدد من الألواح المتماثلة على التفرع فإن الجهد الناتج يساوي جهد لوح واحد أما التيار الناتج فيساوي مجموع التيارات لكل لوح من الألواح أي:[21]

$$I_{Sg} = \sum_{1}^{n} In = I1 + I2 + I3 + ... + In \qquad (9-2)$$

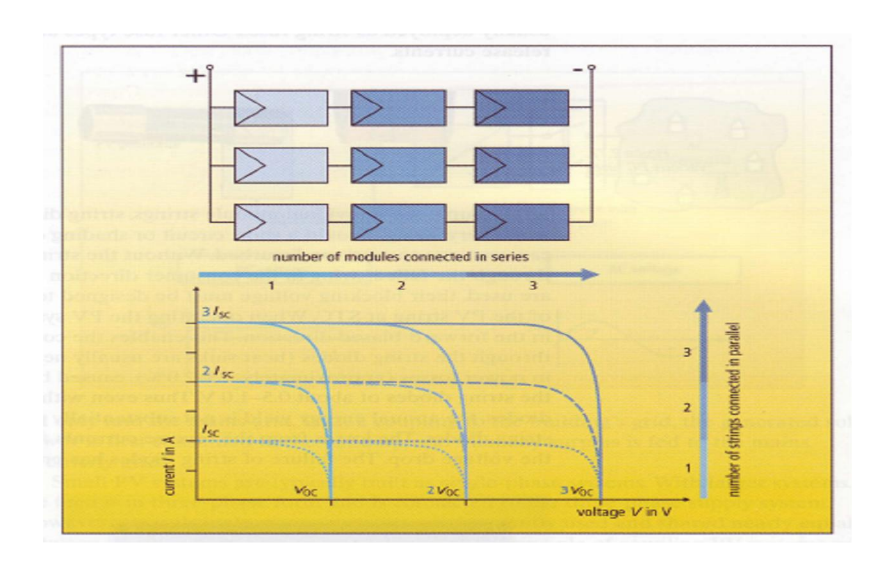
$$Vsg = V1 = V2 = V3 = ---- = Vn \qquad (10 - 2)$$

يظهر الشكل (2–37) المنحني المميز (منحني I – V) لثلاثة ألوح فوتوفولتية موصولة على التفرع.



الشكل(2– 33) منحني (I-V) لثلاثة ألواح فوتوفولتية موصولة على التفرع.[5]

يُمكن أيضاً ربط الألواح بشكل مختلط (على التسلسل وعلى التفرع في آن واحد) كما في الشكل (2–38) الذي يظهر المنحني المميز (I –V) لعدد من الألواح المرتبطة مع بعضها بشكل مختلط.



الشكل(2– 34) منحني (I - V) لثلاثة ألواح فوتوفولتية موصولة بشكل مختلط. [5]

2–11 تطبيقات الخلايا الفوتوفولتية [43] :

تركز الاهتمام على إدخال الفوتوفولتائيات كمصدر للطاقة المتجددة في التطبيقات الأرضية بغية تطوير التقنيات ووسائل الاستخدام في قطاع السكن والصحة والتعليم والصناعة والزراعة والنفط وغيرها، وذلك لاستخدامها في المناطق المعزولة والنائية لإنقاص تكلفة شبكات الكهرباء العامة والمساعدة في الإنماء الاقتصادي والتطوير الاجتماعي المحلي.

يمكن تصنيف وتحديد التطبيقات الأرضية وفق القدرة الكهربائية على النحو الآتي:

a. **التطبيقات ذات القدرة المنخفضة:** تشمل الألعاب الالكترونية والحاسبات والساعات، إضافةً إلى أجهزة الإذاعة المسموعة وشاحنات ووسائط القدرة المنخفضة.

b. **التطبيقات ذات القدرة المتوسطة:** تشمل الإنارة، أجهزة الإذاعة المرئية، ثلاجات اللقاح والأمصال، إشارات المرور والإنذار، ....الخ.

c. **التطبيقات ذات القدرة المتوسطة والعالية:** تشمل ضخ المياه، محطات الأقمار الصناعية الأرضية، الحماية المهبطية لحماية أنابيب النفط والغاز والمنشآت المعدنية من التآكل، تغذية شبكة الكهرباء العامة.

الفصل الثالث

الدراسة المرجعية حول تحسين كفاءة الخلايا الشمسية

3-1 مقدمة:

يعود الاهتمام في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية إلى بداية الخمسينيات من القرن الماضي، حيث تم تطوير شرائح من مادة السيلكون للخلايا الشمسية ولكن في ذلك الوقت كانت كفاءة التحويل لا تتجاوز 6% وبكلفة عالية. لكن مع ازدياد الاهتمام واتساع مجال استخدام الخلايا الشمسية ازداد مردود التحويل إلى 16% وانخفضت كلفة واحدة الاستطاعة، ولا تزال الأبحاث مستمرة لمزيد من التحسينات على أداء الخلايا الشمسية وتقليل تكلفة استخدامها.

يتضمن هذا الفصل التعرّف على طرق تحسين كفاءة الخلايا الشمسية، كما يتم التعرّض فيه إلى بعض الأبحاث العالمية المتعلّقة بمحاولات تحسين كفاءة هذه الخلايا (أبحاث متعلقة ببنية الخلايا، أبحاث متعلقة بتخفيض درجة حرارة سطح الخلايا،....الخ).

3-2 طرق تحسين كفاءة الخلايا الشمسية:

تهتم معظم الأبحاث التي تهدف إلى زيادة كفاءة تحويل الخلايا الشمسية (أي مقدار ما يتحول من طاقة شمسية إلى كهربائية) بتركيب الخلية (مادة السطح، بنية منطقة الاتصال (p-n)، المتصل المعدني الأمامي والخلفي، منطقة العزل المانعة للانعكاس،...الخ)[5] . كما أن عدد من الأبحاث يهتم بمحاولة تخفيض درجة حرارة سطح الخلية لما لها من آثار سلبية على كفاءتها، ومحاولة الاستفادة من هذه الحرارة في بعض التطبيقات.

3-2-1 التحسين المرتبط ببنية الخلايا نفسها:

يمكن تحسين كفاءة الخلية على صعيد الاهتمام ببنيتها وذلك خلال ما يأتي:

3-2-1-1 تحسين بارامترات الخلية الشمسية أثناء تصنيعها [13]:

يمكن لهذه البارامترات أن تكون: (القدرة العظمى، توتر الدارة المفتوحة، تيار دارة القصر،....الخ). يتم ذلك بطرق متعددة :

أ- استخدام الصفائح المتبلورة الملونة: فعند استخدام صبغات مبلورة ذات كفاءة كمية مقاربة للواحد كطلاء وقاية للخلية الشمسية، فإن الكفاءة سوف تزداد بمقدار 2.7 %عند الطلاء باللون الأخضر و 17.27% عند الطلاء باللون الوردي. تعود هذه الزيادة إلى أن الطلاء يقلل الانعكاسية من 40% إلى 20%، وتكون الألوان المفضلة هي الذهبي الأخضر، البني والرصاصي.

ب- استخدام تقنية الأغشية الرقيقة ذات الطبقات المتعددة المتوضعة فوق بعضها بغية الاستفادة إلى أبعد حد من الطيف الشمسي. يمكن ذلك بأن تكون الطبقة العلوية الرقيقة هي التي تلتقط الضوء الأزرق تاركة الضوء الأحمر ينفذ منها إلى خلية أخرى تحتها تكون أكثر فعالية في امتصاصها وهكذا.

ت- استخدام الأنظمة المتعددة الفجوات: تُعدُّ أكثر تناسباً مع الطيف الشمسي من الأنظمة ذات الفجوة المفردة و من ثمّ تكون الكفاءة أعلى.

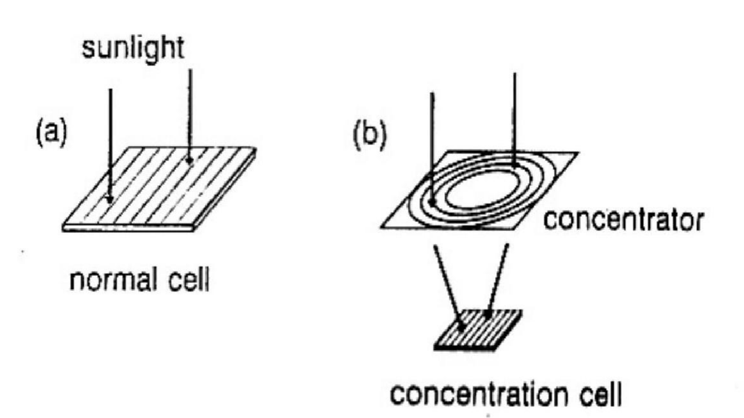
ث- تقنية الخلايا المركبة (Compound Solar Cells): يتم اختبار سبيكة مناسبة من III-V (III-V alloy) لتصنيع نبطية بلورية ذات شبكة متصلة (lattice-match) ترسب على أرضية معينة حيث ترسب أولاً ذات فجوة الطاقة الصغيرة تتبع بمفرق نفقي ثم الخلية ذات فجوة الطاقة الأعلى وتطورت كفاءة هذه الخلية ذات المفرق الواحد البسيط من 20% عام 1980 إلى 30% عام 1996.

ج- خلايا الاتصال المدفون (Buried Contact Solar Cells) : هي محاولة لتطوير كفاءة الأداء بأقل كلفة ممكنة حيث تصلب (تمعدن Mettallised) بوساطة الترسيب اللاكهربائي (electroless deposition) لطبقات (Ni/Cu/Ag). كانت أعلى كفاءة تم الحصول عليها من هذا النوع هي (% 16-18).

ح- خلايا الشبكة المطبوعة (Printed- Screen Solar Cells): تستخدم عادة فيها طبقات من السليكون المطعم بالبورون وتصنع بطريقة قوالب (CZ) وهي ذات كفاءة بين 10% إلى 13%.

3-2-2 استخدام المركّزات الشمسية (Solar Concentrators) [13]:

يمكن تركيز الإشعاع الشمسي الواصل إلى الخلية الشمسية بوضع عدسة زجاجية قبل الخلية كما في الشكل (3-1-b). يكون السبب الرئيس لاستعمال المركّزات للخلايا الشمسية الفوتوفولتية هو خفض كلفة هذه الخلايا عن طريق تقليل مساحتها، حيث تكون تكلفة صناعة المركّزات قليلة مقارنةً مع سطح الخلايا التي تم توفيرها. كما أن توليد الكهرباء من خلايا صغيرة مع استخدام مركّزات هو أكثر فعالية من الخلايا التي تُعد غالية جداً إذا ما اُستعملت بدون مركّزات.



الشكل (3-1) خلية شمسية مركزة وخلية شمسية عادية [13]

تستخدم المركّزات الإشعاع الشمسي المباشر فقط ولا تستخدم الإشعاع المبعثر، لذلك سيكون استعمالها مفيداً في الأوقات التي يتوفر فيها إشعاع مباشر بكمية كبيرة. يجب توضّع المركّزات بشكل مواجه للشمس دائماً، وتكون إما ثابتة لا تحتاج إلى معقبات لأثر الشمس بحيث تكون ذات زوايا استقبال مناسبة والخلايا المستخدمة في هذه الأنظمة هي خلايا السليكون التقليدية، أو تكون معقبة وفي هذه الحالة تكون ذات نسبة تركيز أعلى من الثابتة وذات كفاءة أفضل. دفع ذلك إلى تصنيع المعقبات وهو نظام غير مرغوب به ومعقّد فضلاً عن كونه مكلفاً اقتصادياً وبحاجة إلى صيانة مما قلل الرغبة في الاعتماد عليه.

استُخدم في المملكة السعودية في عام 1988 نظاماً ضخماً ذي مركّزات يستخدم عدسات فرينل بطاقة خرج قدرها 300 kW وذي مردود قدره 9%. كما استُخدم نظاماً آخر من هذا النوع في ولاية تكساس في الولايات المتحدة الأمريكية بمردود حوالي 13%.

يتحقق تركيــز الإشعاع الضوئي إما باستخدام imaging ـــ optics أو nonimaging - optics ، حيث ينقل النوع الأول الضوء إلى نقطة واحدة كالبؤرة مثلاً عند استخدام العدسات، أما النوع الثاني فينقل السيل الإشعاعي من منطقة معينة إلى أخرى وينقل كلاً من الإشعاع المباشر والإشعاع المنتشر.

توجد مقاييس عديدة لاختيار المركّز المطلوب منها: درجة التركيز والحرارة الناتجة، حيث أنّ تركيز القدرة في نقطة يولد حرارة بين عالية إلى عالية جداً أما عند تركيزها في خط يجعل الحرارة المتولدة من معتدلة إلى عالية.

لأجل معرفة أي المركّزات هي الأفضل في الاستخدام فيجب المقارنة فيما بينها من حيث اعتبارات متعددة هي: نسبة التركيز، زوايا السقوط، مساحة السطح العاكس ومعدل عدد الانعكاسات. إنّ أهم المعايير لتقييم عمل المركزات هي نسبة التركيز (C) التي من الممكن أن تكون نسبة التركيز الهندسي (النسبة بين مساحة فتحة الدخول (A_1) إلى مساحة الماص أو فتحة الخروج (A_2) أي $Cg = A_1/ A_2$)، كما يمكن أن تكون نسبة تركيز الفيض (نسبة الإشعاع الإجمالي الساقط على الماص إلى نسبة الإشعاع على فتحة الدخول ($C = G_2/G_1$

يوجد أنموذجان للمركّزات الشمسية هما:[13]

1) مركزات البؤرة النقطية (Point Focus Concentrator): هي مركّزات ثلاثية الأبعاد تستخدم عموماً عندما يُشترط وجود تركيز عالٍ (C = 500-1000) وتستخدم في الأفران الشمسية ومستقبلات القدرة المركزية، التي استُخدمت لأول مرة بوساطة علماء سوفييت عام 1960م ومن أحدث برامجه هو "Solar 2 "ذي الإنتاجية الكهربائية المقدّرة بـــ 10 MW في صحراء كاليفورنيا وقد شُغّل عام 2000. كذلك تُعد المركّزات المخروطية وعدسات فرينل النقطية البؤرة من هذا النوع الثلاثي الأبعاد.
2) مركزات البؤرة الخطية (Focus concentrator Linear): هي المركزّات الثنائية الأبعاد مثل عدسات فرينل ذات البؤرة الخطية وأحواض القطع الناقص المركب (CPC) ويتم اختيارها عندما يراد استخدام التركيز المتوسط أو الضعيف

3-2-3 التحسين المرتبط بتخفيض درجة حرارة الخلية:

عندما يسقط الضوء على الخلية الشمسية تمتص الخلية قسماً منه ليتحوّل إلى طاقة كهربائية، أما الفائض فيتحول إلى حرارة. يوجد ثلاثة مقادير أساسية تستخدم بشكل اعتيادي لتوصيف خرج الخلية الشمسية، كما ذكرنا في الفصل الثاني، وهي: تيار دارة القصر (I_{SC}) وجهد الدارة المفتوحة (V_{OC}) وعامل الملء (FF). تعتمد هذه المقادير على درجة حرارة الخلية، ونظراً لارتباط المردود بهذه المقادير فهو بدوره يتأثر بدرجة الحرارة أيضاً. فارتفاع درجة حرارة سطح الخلية يلعب دوراً سلبياً بالنسبة لمردودها، حيث ينقص عند ارتفاع درجة الحرارة عن حد معين.

لذلك يمكن تحسين المردود بإيجاد طرق لتخفيض درجة حرارة سطح الخلية عن طريق تبريدها بالماء أو الهواء. سنستعرض بعض هذه الطرق من خلال عرضنا للأبحاث المنجزة على الخلايا الشمسية، والتي تهتم بزيادة المردود من خلال تخفيض درجة حرارة سطح الخلية، في الفقرة اللاحقة.

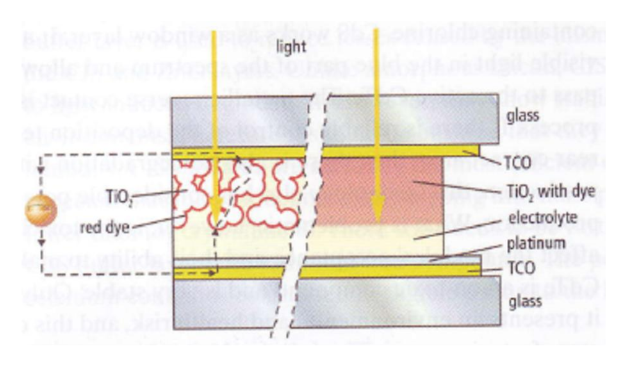
3-3 الأبحاث المنجزة على الخلايا الشمسية:

أُنجزت العديد من الأبحاث والدراسات على الخلايا الشمسية على مدار السنوات الماضية وما تزال الأبحاث مستمرة بغية دفع هذه التقنية إلى مزيد من التطور، بحيث تسد جزءاً من الاحتياجات الطاقية وبأقل التكاليف. سنقوم باستعراض نتائج بعض هذه الأبحاث كما يأتي:

3 -3-1 أبحاث منجزة على بنية الخلية وتركيبها(أفكار جديدة للخلايا الشمسية):

3 – 3 –1 –1 أبحاث على خلايا شمسيّة ذات حساسية صبغية (فوتوالكتروكيميائية) (DSSC):[5]

قام البروفسور السويسري ميشيل غراتزل (Michael Grätzel) في عام 1991م بأبحاث حول هذا النوع الجديد من الخلايا الشمسية وقدمها كتقنية يمكن لها أن تصبح بديل عن تكنولوجيا السيليكون. إنّ المادة الرئيسة لخلايا غراتزل هو نصف الناقل المكوّن من ثاني أوكسيد التيتانيوم (TiO_2)، حيث لا تعمل هذه الخلايا على مبدأ منطقة الاتصال (p-n) لنصف الناقل وإنّما تمتص الضوء في طبقة عضوية صبغية بشكل مماثل للطريقة التي تستخدم فيها النباتات الكلوروفيل لامتصاص الطاقة من الشمس في عملة التمثيل الضوئي. يبين الشكل (3-2) تركيبة طبقية لخلايا غراتزل



الشكل (3-2) تركيبة طبقية لخلايا كريدزل

تُعدُّ الخلايا الشمسية ذات الحساسية الصبغية والبنية البلورية الدقيقة (nanocrystallline) مختلفة عن الخلايا الشمسية التقليدية. يتوضع فيها كل من ثاني أوكسيد التيتانيوم (TiO_2) والمحلول الملحي الموصل، المستخدم كالكتروليت، بين الكترودين موصلين وشفافين (يغطى الغطاء الزجاجي بأوكسيد ناقل شفاف TCO). يتوضع ثاني أوكسيد التيتانيوم على الالكترود العلوي باستخدام إجراء يسمى(screen-printing). تُطبخ الطبقة عند الدرجة 450°C لتشكل غشاء صلب رقيق سماكته 10µm. يخلق ذلك تركيبة قاسية ذات مسامات صغيرة تتألف من جزيئات بسماكة (10–30nm). وبالنتيجة يكون السطح الداخلي لهذا الإسفنج الضوئي أكبر بألف مرة من طبقة رقيقة ملساء. إذا كان ثاني أوكسيد التيتانيوم يمتص فقط الأشعة فوق البنفسجية، يغطى سطح ثاني أوكسيد التيتانيوم بطبقة رقيقة جداً من الروتينيوم الصبغي. يدخل الالكتروليت السائل بشكل كامل الطبقة المسامية، وبذلك يوصل الطبقة الصبغية مع الالكترود السفلي.

عندما يسقط الضوء على الخلية، فإنّ الصبغة تتهيج وتحقن الإلكترون في ثاني أوكسيد التيتانيوم. يمر الالكترون عبر جزيئات ثاني أوكسيد التيتانيوم إلى الالكترود العلوي، وتصل إلى الالكترود السفلي عن طريق دارة خارجية. يساعد وجود مادة البلاتين على نقل الإلكترون إلى المحلول الالكتروليتي، وينقل الالكتروليت الالكترونات ثانية إلى الطبقة الصبغية وتكتمل الدارة.

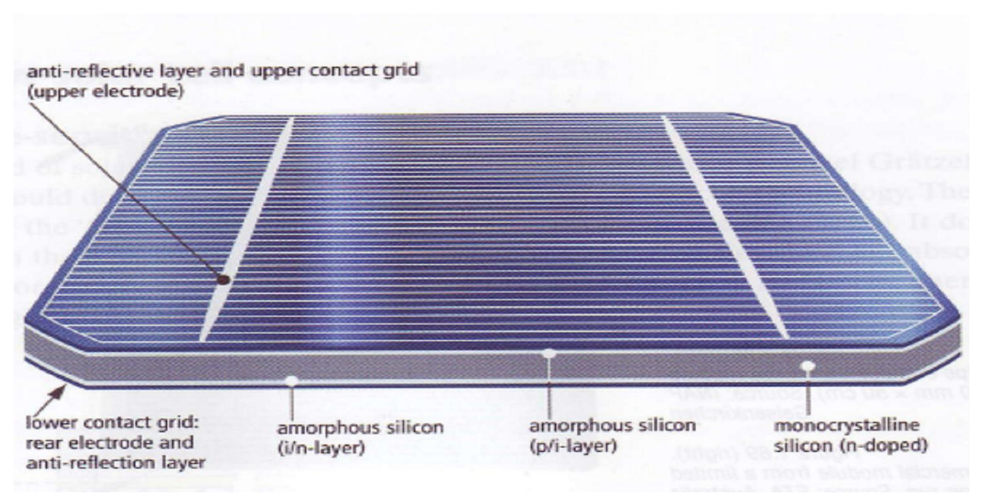
الميزة الفريدة لهذا النوع من الخلايا هو أنّ امتصاص الضوء ونقل حوامل الشحن يمر عبر مواد مختلفة. يتم خلق الشحنات بوساطة الضوء الممتص في الصبغة، بينما يكون نصف الناقل (TiO_2) والأيونات المتحررة في الالكتروليت هما المسئولان عن النقل.

أُنتجت خلايا مخبرية صغيرة من هذا النوع بمردود حوالي 12%. برهنت هذه الخلايا بإمكانية التسامح من حيث زاويا السقوط الصغيرة والتظليل، إضافة إلى أن المردود (على نقيض نماذج الخلايا البلورية) يزداد فعلياً عند درجات الحرارة المرتفعة. يمكّن ذلك من استخدامها في أجهزة صغيرة في أمكنة داخلية.

يركّز عدد من المخابر أبحاثه حديثا على هذا النوع من الخلايا، بسبب مردودها العالي نسبياً (حوالي 11%) وتكلفة إنتاجها المنخفضة [22] كما تثير الاهتمام الخلايا ذات الحساسية الصبغية التي تستعمل طبقات بلاستيكية رقيقة تُستخدم كالكترود ضوئي، بسبب إمكانية استخدامها في التطبيقات التجارية، ولكن أحد مشاكل الخلايا التي تستخدم الطبقة البلاستيكية هي أن مردودها أقل من تلك التي تستخدم مادة الزجاج. فمادة البلاستيك لا تملك استقرار حراري عند درجات الحرارة العالية (450–550 ºC) المُتطلبة للالكترود الضوئي لــ TiO_2 في هذا النوع من الخلايا، لذلك يجب أن يعامل تحت درجات حرارة أقل من(150°C)، وقد اقتُرحت عدة طرق لحل هذه المشكلة منها طريقة الضغط حيث تُضغط طبقات الأوكسيد لإنتاج طبقة رقيقة مسامية. [22]

3- 3-1-2 أبحاث على الخلايا الهجينة (HIT):[5]

تشكل هذه الخلايا دمجاً بين الخلايا البلورية التقليدية والخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة. تتألف الخلية من السيليكون البلوري وغير المتبلور التي ترتبط مع طبقة رقيقة منشطة. تكون نواة الخلية هي عبارة عن رقاقة أحادية البلورة تغطى من جهتيها بطبقة رقيقة من السيليكون غير المتبلور كما في الشكل (3-3). تقوم طبقة وسيطة رقيقة جداً منشطة من السيليكون غير المتبلور بربط الرقاقة البلورية مع طبقتيها غير المتبلورتين. فالطبقة المنشطة ايجابياً تتوضع على الجهة الأمامية التي تشكل الوصلة (p-n) مع الرقاقة الأحادية البلورة المنشطة سلبياً. وجدنا أنه يتم تشكيل الوصلة (p-n) في الخلايا الشمسية السيليكونية التقليدية بتنشيط نفس المادة نصف الناقلة بشكل مختلف، بينما في الخلايا الشمسية الهجينة يحدث ذلك بين نصفي الناقل المختلفين في التركيب وتدعى هذه بالوصلة الهجينة (p-i-n). تغطى الجهة الخلفية من الرقاقة بالسيليكون غير المتبلور المنشط سلبياً بشكل كبير لتمنع حوامل الشحنة الحرة من إعادة الاتحاد على الالكترود الخلفي. كما يوجد على سطح الخلية العلوي غطاء مانع للانعكاس لتقليل ضياعات الانعكاس.



الشكل (3-3) تركيبة طبقية لخلية شمسية هجينة (HIT) [5]

تتميز الخلايا الشمسية الهجينة، بالمقارنة مع الخلايا الشمسية البلورية، بالحصيلة الطاقية الأكبر عند درجات الحرارة الأعلى. فمن أجل كل زيادة في درجة الحرارة بمقدار (1°C) يسوء الأداء فقط بمقدار 0.33% بالمقارنة مع % 0.45 للخلايا الكريستالية السيلكونية. يبلغ مردود هذا النوع من الخلايا 17.3%.

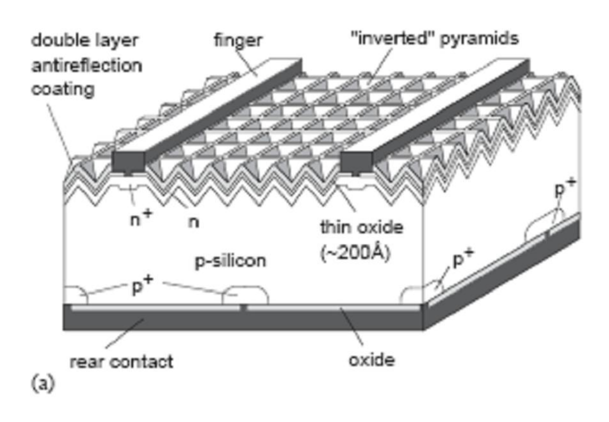
يمكن تحسين الخلايا الشمسية الهجينة من حيث الأداء والسعر، كما أظهرت بعض الأبحاث، خلال تحسين مردود التحويل، واستعمال مواد أرق، وتحسين معامل درجة الحرارة للمردود. فالبحث المذكور في المرجع [23]، يظهر تمكّن الباحثون من الوصول إلى مردود بحدود 23% من أجل مساحة قدرها ($100.4\ cm^2$)، كما تمكنوا من تطوير تقنيات جديدة لاستخدام مواد أرق و من ثمّ حصلوا على جهد دارة مفتوحة عالي (V_{oc}=743 mV) ومردود تحويل عالي قدره 22.8% باستخدام مادة ذات سماكة قدرها 98µفقط.كما أظهرت الدراسة إمكانية تخفيض سماكة المادة للخلية إلى أكثر من 50% بينما يتم المحافظة على مردودها.

3- 3-1-3 أبحاث على السطح العلوي للخلايا:[24]، [25]

يوجد نوعان أساسان من الضياعات الرئيسة التي تخفّض مردود التحويل للخلايا الشمسية السيليكونية وهي الضياعات الكهربائية و الضياعات البصرية. يمكن منع الضياعات البصرية، التي تحدث بسبب الانعكاس على سطح الخلية الشمسية، بتغطية سطح الخلايا بطبقة مانعة للانعكاس أو عن طريق الأسطح المتعرجة (Textured surfaces). فمن المعروف أن الأسطح المصقولة تعكس 30% من الضوء الساقط عليها، بينما تعكس الأسطح المتعرجة فقط 10% والمغطاة بطبقة مانعة للانعكاس تعكس فقط 3%. بتخفيض انعكاس الضوء على سطح الخلايا الشمسية يمكن زيادة تيار دارة القصر، وبذلك يزداد مردود التحويل للخلايا الشمسية. أجريت العديد من الأبحاث لاستخدام الأسطح المتعرجة و من ثمّ تخفيض سطح الانعكاس الضوئي على سطح الخلايا الشمسية، حيث استُخدم للحصول على هذه الأسطح المتعرجة محاليل قلوية مثل هيدروكسيد البوتاسيوم وهيدروكسيد الصوديوم ولكن حديثاً تستخدم نماذج من هيدروكسيد الأمونيا وبشكل خاص تيترا ميتيل هيدروكسيد الأمونيوم لأن هيدروكسيد البوتاسيوم له مشاكل مرتبطة بالتلوث الذي تسببه أيونات البوتاسيوم.

وجد بعض الباحثون **[24]** أن استخدام محلول حمضي لحفر السطح قد حسّن أثر التعرج على السطح، حيث تشكّلت أهرامات صغيرة منتظمة على سطح السيليكون، وهذا قلل من انعكاسية السطح وزاد تيار دارة القصر و من ثمّ زاد مردود التحويل للخلية.

كما أنّ دراسة أخرى [25] تمكّن فيه الباحثون من الحصول على مردود قدره 23.3% لخلايا شمسية سيلكونية أحادية البلورة مخبرية وكان هو المردود الأكبر على الإطلاق للألواح الفوتوفولتية من ذلك القياس ($787cm^2$). قامت الدراسة على أساس تقليل انعكاسية السطح باستخدام طبقة تغطية للسطح مانعة للانعكاس مضاعفة و قطع على شكل أهرامات مقلوبة (PERL) كما في الشكل (3-4).



الشكل (3-4) نموذج لخلية شمسية ذات طبقة مانعة للانعكاس مضاعفة على شكل أهرامات مقلوبة.

3 -3-2 أبحاث منجزة لدراسة أثر درجة حرارة عمل الخلايا الشمسية على مردودها: يلعب ارتفاع درجة الحرارة لسطح الخلية الشمسية دوراً سلبياً على مردودها، لذلك كان محور العديد من الأبحاث

ضرورة الاهتمام بهذا الجانب من حيث الدراسة الفعلية لأثر ارتفاع درجة الحرارة على المقادير الأساسية للخلية الشمسية و من ثمّ مردودها، خلال محاولة إيجاد الحلول لتخفيض درجة حرارة سطح الخلية بتبريدها.

أظهر الباحثون في الدراسة [26] أنه بشكل عام يكون تغيّر تيار دارة القصر مع تغيّر درجة الحرارة مهمل، ولكن يتغيّر بحدود معتبرة من أجل كل وقت النهار و من ثمّ يجب أن لا يُهمل هذا التغير عند تقييم مردود الخلية الشمسية. كما أظهرت الدراسة [27] تأثير درجة الحرارة على جهد الدارة المفتوحة، فعندما ترتفع درجة الحرارة ينخفض جهد الدارة المفتوحة و من ثمّ يتأثر المردود ويكون هذا التأثر وفقاً لتابع معتمداً عن الارتفاع عن حد معين. كذلك الأمر أظهرت الدراسة [28] أنّ كلاً من المردود الكهربائي وقدرة الخرج للوح شمسي فوتوفولتي تعتمد خطياً على درجة حرارة التشغيل، حيث تتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة.

أظهرت أبحاث أخرى حلول للحد من ارتفاع درجة حرارة سطح الخلايا الشمسية عن حد معين، وذلك بتبريد سطح هذه الخلايا. ففي الدراسة [29] تم تبريد سطح الألواح الشمسية الفوتوفولتية، المستخدمة في نظام ضخ للماء، برش الماء على شكل رذاذ فوق سطح هذه الألواح، وقد أدى ذلك إلى زيادة استطاعتها و من ثمّ زيادة مردود الألواح الشمسية بمقدار 3.26% و مردود النظام بأكمله بمقدار1.35%. أما الدراسة [30] فقد أظهرت إمكانية ربط نظام فوتوفولتي مع نظام حراري خلال نظام مدمج أو هجين (PV/T)، حيث تدمج الألواح الشمسية مع لاقط حراري موصول بخزان حراري عبر دارة مغلقة، يتحسن مردود الخلايا الفوتوفولتية من خلال تخفيض درجة حرارتها بإعطاء الحرارة المتحررة من هذه الألواح إلى اللاقط الحراري الذي يقوم بتسخين الماء الذي يدور فيه.

سنهتم في هذا البحث بتحسين المردود من خلال خفض درجة حرارة سطح الألواح الشمسية بتبريدها، وذلك باستخدام أنواع مختلفة من التبريد هي: التبريد المائي، التبريد الهوائي، التبريد الهوائي والمائي.

الفصل الرابع

الدراسة التجريبية

4-1 مقدمة:

استنتجنا من الدراسة المرجعية التي قمنا بها، والتي تطرقت إلى أساليب تحسين مردود الخلايا الشمسية، أنّ الأساليب المعتمدة على تخفيض درجة حرارة سطح الخلايا هي الطرق التي يمكن تحقيقها على صعيد عملنا من حيث الكلفة والإمكانيات.

من هنا بُنيت فكرة هذا البحث بالدراسة التجريبية لتحسين مردود منظومة فوتوفولتية باستخدام التبريد لسطح الألواح الفوتوفولتية المُستخدمة فيها لخفض درجة حرارتها، حيث استخدمنا منظومتين فوتوتوفولتييتين، الأولى تتألف من خلايا لابلورية صينية الصنع تم تجميعها محلياً على شكل ألواح(أجرينا عليها تجربة واحدة وهي تجربة التبريد المائي)، والثانية تتألف من خلايا متعددة البلورات ألمانية الصنع مجمعة على شكل ألواح من المصدر.(أجرينا عليها ثلاث أنواع من التجارب، مائي، هوائي، مائي وهوائي) كما كان لابد من إجراء المقارنة في كل منظومة بين اللوح المبرد واللوح الغير مبرد ذلك لملاحظة دور التبريد وأثره على المردود.

4-2 مكان الجهاز التجريبي المُختبر:

أُجريت الدراسة التجريبية لهذا البحث على سطح منزلي الكائن في مدينة جبلة الواقعة على خط عرض 35.5°. أما اختبار التجهيزات الأولي، والذي تمّ في الفترة الزمنية التي سبقت إجراء التجارب الرسمية للبحث، فقد أُجري على سطح كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في مدينة اللاذقية الواقعة على خط العرض نفسه لمدينة جبلة تقريباً.

4-3 توجيه الألواح:

وُضعت الألواح الفوتوفولتية لكلتا المنظومتين على الحوامل المعدنية في مكان يضمن أنها لـــن تكـــون مظللة في أي يوم من أيام السنة. و تمّ توجيه الألواح نحو الجنوب.

4-4 تحديد زاوية ميل الألواح على الأفق:

كانت زاوية ميل الألواح على الأفق متغيرة حسب الطلب وكان ذلك ممكناً لأنّ الحوامل المعدنية كانت مصممة على هذا الأساس، بحيث يتم تغيير زاوية الميل يدوياً لتجعل الألواح مواجهة للشمس. لكن تمت مراعاة القاعدة العامة في تحديد زاوية ميل الأنظمة الشمسية على الأفق وهي أنّ زاوية الميل خلال

شهور الصيف هي زاوية [خط العرض− (10°)]، وخلال شهور الشتاء هي [زاوية خط العرض+ (10°)]، وخلال فصلي الربيع والخريف هي زاوية خط العرض نفسها.

4−5 اختبار تجهيزات المنظومات:

أُجريت اختبارات متعددة على المنظومتين الفوتوفولتيتين، بعد تركيب مختلف تجهيزاتهما وقبل البدء بالتجارب الرسمية، وذلك بغية التأكد من دقة القياسات المراد الحصول عليها من النظام، ولفهم آلية عمل هذه الأجزاء وبعض الأعطال التي يمكن أن تعيق عملها

4−6 التجارب المنجزة على المنظومات الفوتوفولتييتين:

4−6−1 التجربة المنجزة على المنظومة الأولى:

أُجريت هذه التجربة على المنظومة الأولى والتي تتألف كما في الشكل (4−1) من ما يأتي:

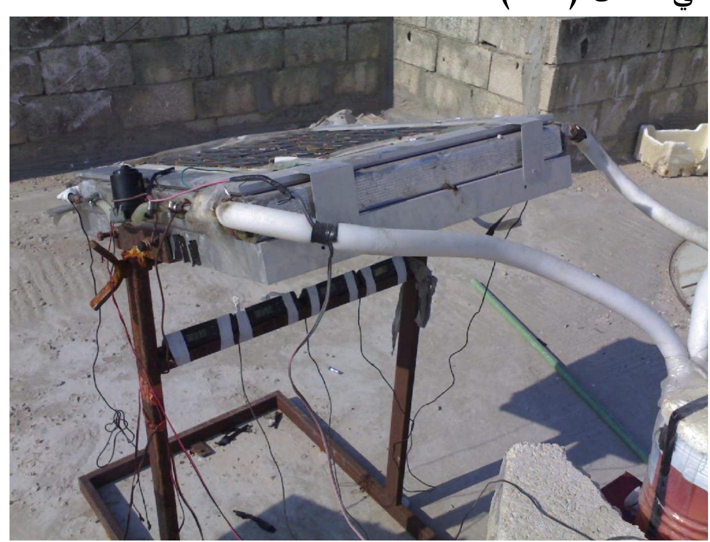
1. لوحين فوتوفلطيين متماثلين بأبعاد (50×50 cm) يتألف كل منهما من 60 خلية فوتوفولتية غير متبلورة وهي صينية الصنع وتم تجميعها محلياً، حيث وُصلت مع بعضها البعض بشكل مختلط.
2. خزان معدني معزول أبعاده (50×50×5cm) متوضع تحت اللوح بشكل مباشر لتبريده، يحوي على 70% ماء +30% مانع تجمد، موصول مع مبادل حراري نحاسي.
3. خزان ماء معزول يحوي 1.5لتر ماء.
4. خزاني ماء معزولين يحوي كل منهما 1 لتر ماء.
5. مضخة تدوير تعمل على جهد 12V تقوم بتدوير الماء ضمن دارة التبريد.
6. مقاييس درجات الحرارة عدد/5/ لقياس درجة حرارة دخول الماء إلى الخزان المعدني الموجود تحت اللوح الشمسي(المُبرد) ودرجة حرارة خروجه، وقياس درجة حرارة اللوح الفوتوفولتي وكذلك درجة حرارة الماء في الخزان .

❖ **آلية العمل**: تمّ تبريد أحد اللوحين الفوتوفولتيين وذلك بوضع خزان معزول أبعاده (50×50×5cm) يحوي على ماء ومانع تجمد وموصول مع مبادل حراري، وبذلك يتم انتقال الحرارة المسحوبة من اللوح الشمسي إلى الخزان ومنه عبر المبادل الحراري إلى ماء موجود في خزان حراري (ترمس) كما في الشكل (4−1)



الشكل (4-1) المنظومة الأولى ذات الخلايا الصينية الصنع

أُجريت تجارب هذه المنظومة بمعدل ست ساعات باليوم، من (10 صباحاً) وحتى (16 عصراً) حيث أُخذت القياسات كل ساعة لدرجات حرارة دخول الماء و خروجه من وإلى الخزان (المّبرِّد) تحت اللوح االفوتوفولتي، كما هو مبين في الشكل (4-2) .

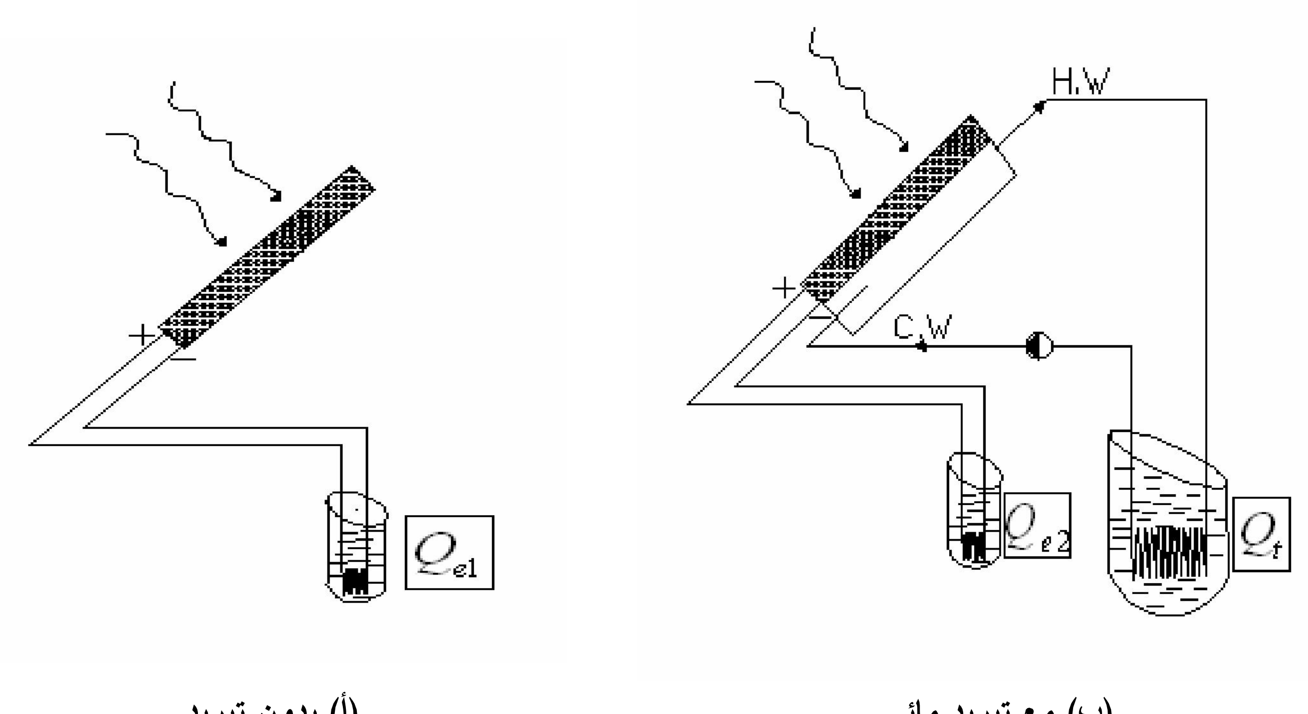


الشكل (4-2) اللوح المُبرّد مع خزان التبريد المتوضع أسفل اللوح

❖ **مخطط العمل:** يبين الشكل (4-3) مخطط العمل للمنظومة الأولى في حالة التبريد وبدونه، (أ)يمثل المنظومة العادية بدون تبريد، (ب) يمثل المنظومة المبردة.

ففي حالة التبريد (الشكل 4-3-ب) يظهر الخزان الحراري الملتصق بأسفل اللوح الفوتوفولتي وهو موصول بخزان حراري عن طريق مبادل حراري عن طريق مبادل حراري مغمور فيه، ويتم قياس كمية الحرارة المسحوبة من لوح التبريد والمُستثمرة في تسخين الماء في الخزان ذي المبادل ويُعبر عن هذه الحرارة بـــ (Q_t). أما الخزان الحراري (الترمس) الذي يتم فيه قياس الأثر الكهربائي للوح فيتصل مع اللوح من خلال مقاومة موضوعة فيه تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية التي يعطيها اللوح إلى طاقة حرارية تقوم بدوها بتسخين ماء الخزان ويُعبّر عن كمية الحرارة هذه بـــ(Q_{e2}). أما اللوح الذي لا

يُستخدم فيه التبريد(الشكل 4-3-أ) فيوصل مع خزان حراري (ترمس) عن طريق مقاومة كهربائية تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية الناتجة عن اللوح على طاقة حرارية يكتسبها الماء ويُعبر عنها(Q_{e1})



(ب) مع تبريد مائي **(أ) بدون تبريد**

الشكل (4-3) مخطط العمل للمنظومة الأولى في حالة تبريد مائي بخزان عادي

❖ **منهجية أخذ القياسات على المنظومات الفوتوفولتية المُختبرة:**

تضمّنت المرحلة اللاحقة للاختبارات المنجزة على هذه المنظومة وضع منهجية موحدة للقياسات التي يجب انجازها خلال التجارب. حيث قررنا أن تكون مختلف التجارب بمعدّل 6 ساعات لكل يوم مُخصص لإجراء التجربة بدءاً من الساعة العاشرة صباحاً حتى الساعة الرابعة بعد الظهر.

و قررنا إجراء القياسات الآتية في هذه التجربة وهي: قياس قيم $T_1، T_2، T_{2'}$ عند كل ساعة. أما شدة الإشعاع الشمسي فلم يكن بالإمكان قياسها لعدم توفر جهاز قياس شدة الإشعاع الشمسي، بل تم حسابها اعتماداً على طريقة (ASHRAE) (المذكورة في الفصل الأول) وكانت الحسابات لكل ساعة من ساعات اليوم المراد إجراء التجربة فيه كما في الجداول الموجودة في الملحق (A) ، وبعدها قمنا بحساب كميات الحرارة في كلا المنظومتين Q_{e2}, Q_{e1}.

$$Q_{e1} = m_1 \cdot C_p \cdot (T_{1(t+\Delta t)} - T_{1(t)}) \qquad (1-4)$$

$$Q_{e2} = m_2 \cdot C_p \cdot (T_{2(t+\Delta t)} - T_{2(t)})$$

بالإضافة إلى حساب كمية الحرارة الناتجة عن استغلال الأثر الحراري للوح الفوتوفلطي Q_t

$$Q_t = m_{2'} \cdot C_p \cdot (T_{2'(t+\Delta t)} - T_{2'(t)})$$

حيث أنّ Q_{e1}:كمية الحرارة المعبّرة عن الأثر الكهربائي الناتج عن اللوح غير المبرد والتي يكتسبها الماء في الخزان الحراري.

Q_{e2}: كمية الحرارة المعبّرة عن الأثر الكهربائي الناتج عن اللوح المبرد والتي يكتسبها الماء في الخزان الحراري.

Q_t:كمية الحرارة المعبرة عن الأثر الحراري الناتج عن اللوح المبرد والتي يكتسبها الماء في الخزان الحراري ذي المبادل الحراري من تبريد اللوح عن طريق الماء الموجود في الخزان المتلامس مع أسفل اللوح.

m_1، m_2 كمية الماء في كلا الخزانين الحراريين (الترمس) للوحين العادي و المبرد وهي في تجربتنا 1liter.

$m_{2'}$ كمية الماء في الخزان الإضافي وهو هنا 1.5 liter

C_P: السعة الحرارية للماء.

T_1: درجة حرارة الماء في الخزان الحراري (الترمس) الموصول مع اللوح غير المبرد.

T_2: درجة حرارة الماء في الخزان الحراري (الترمس)الموصول مع اللوح المبرد.

$T_{2'}$: درجة حرارة الماء في الخزان الحراري ذي المبادل الحراري المتصل مع دارة التبريد للوح المبرد.

$T_{(t+\Delta t)}$:درجة حرارة الماء في الخزان الحراري في اللحظة الزمنية (t+Δt) (°c).

$T_{(t)}$: درجة حرارة الماء في الخزان الحراري في اللحظة الزمنية (t) (°c).

Δt: الفاصل الزمني بين كل قياس وآخر وهو في دراستنا ساعة واحدة.

ومنه نحسب المردود الكهربائي للمنظومة الأولى:

$$\eta_1 = \frac{Q_{e1}}{A_c \cdot H_t} \qquad (2-4)$$

المردود الكهربائي للمنظومة الثانية:

$$\eta_2 = \frac{Q_{e2}}{A_c \cdot H_t} \qquad (3-4)$$

ومردود المنظومة الثانية الكلي(مع اعتبار الأثر الحراري):

$$\eta_{tot} = \frac{Q_{e2} + Q_t}{A_c \cdot H_t} \qquad (4-4)$$

منه يمكن حساب الزيادة النسبية في المردود :

$$\Delta\eta = (\eta_2 - \eta_1) \times 100/ \ \eta_2 \qquad (5-4)$$

$$\Delta\eta_{tot} = (\eta_{tot} - \eta 1) \times 100/ \ \eta_{tot} \qquad (6-4)$$

حيث أنّ:

η_1: المردود الكهربائي للوح غير المبرد.

η_2: المردود الكهربائي للوح المبرد.

H_t :شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح الفوتوفولتية وتحسب بطريقة (ASHREA) حسب الملحق (A).

η_{tot}: المردود الكلي (يأخذ بعين الاعتبار الأثر الكهربائي والحراري) للمنظومة في حالة التبريد.

$\Delta\eta$:التغير النسبي في المردود الكهربائي.

$\Delta\eta_{tot}$:التغير النسبي في المردود الكلي.

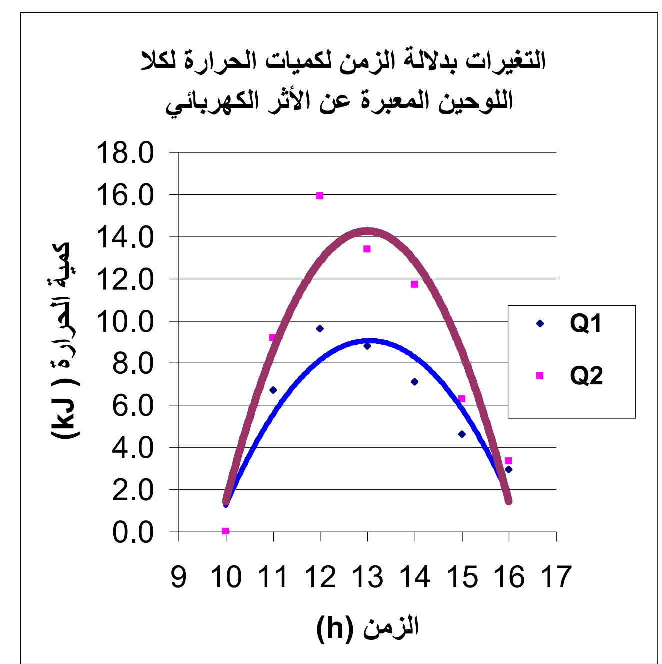
و بعد ذلك نظمنا النتائج في جداول كالآتي:

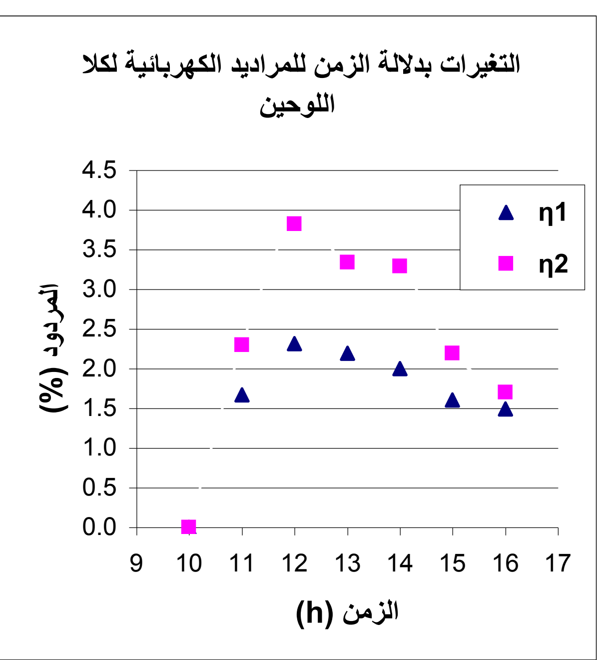
كما تظهر النتائج خلال أشكال تعبّر عن التغيرات بدلالة الزمن لكل من المراديد الكهربائية للوحين المبرد والعادي ، وكميات الحرارة المعبرة عن الأثر الكهربائي لكلا اللوحين المبرد والعادي ،ودرجات الحرارة للماء في الخزانين الحراريين (الترمس) الموصولين مع اللوحين المُبرد والعادي .

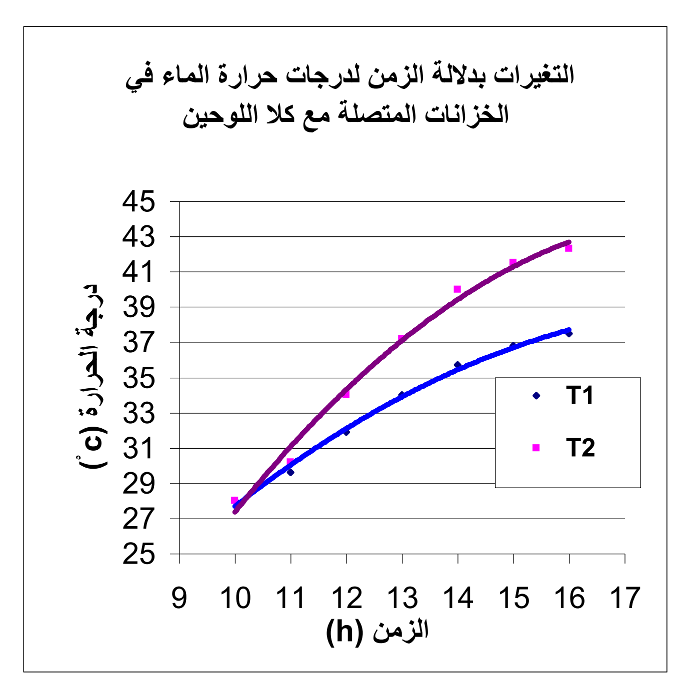
الجدول (1-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 02/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	28.0	28.0	28.0	0.00	0.00	0.00	873.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	29.6	30.2	29.0	6.70	9.21	6.28	982.39	1.67	2.30	27.27	3.86	56.76
12	31.9	34.0	30.8	9.63	15.91	11.30	1019.75	2.31	3.82	39.47	6.54	64.62
13	34.0	37.2	32.4	8.79	13.40	10.05	982.39	2.19	3.34	34.38	5.85	62.50
14	35.7	40.0	33.6	7.12	11.72	7.53	873.24	2.00	3.29	39.29	5.40	63.04
15	36.8	41.5	34.3	4.60	6.28	4.40	701.12	1.61	2.19	26.67	3.73	56.86
16	37.5	42.3	34.7	2.93	3.35	2.51	481.30	1.49	1.70	12.50	2.98	50.00
				39.77	59.86	42.07						



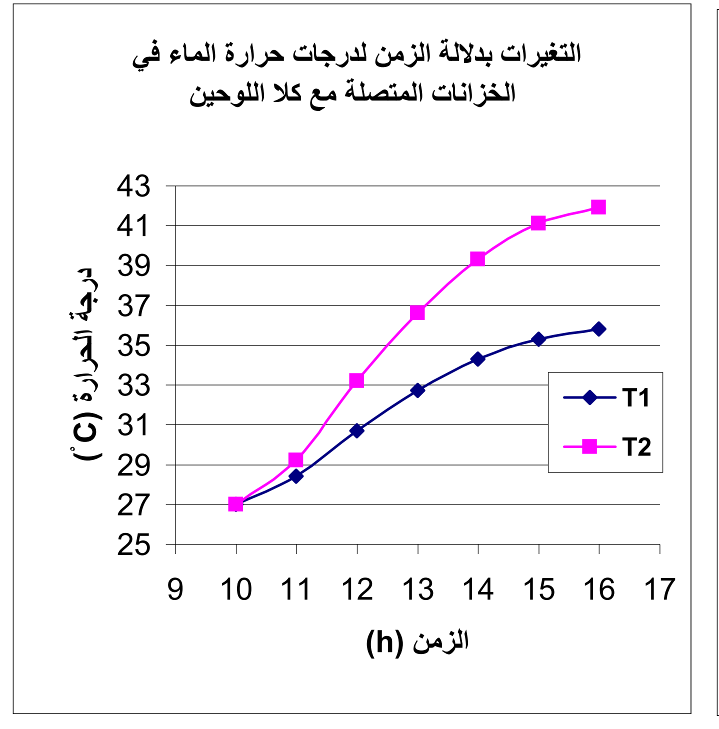


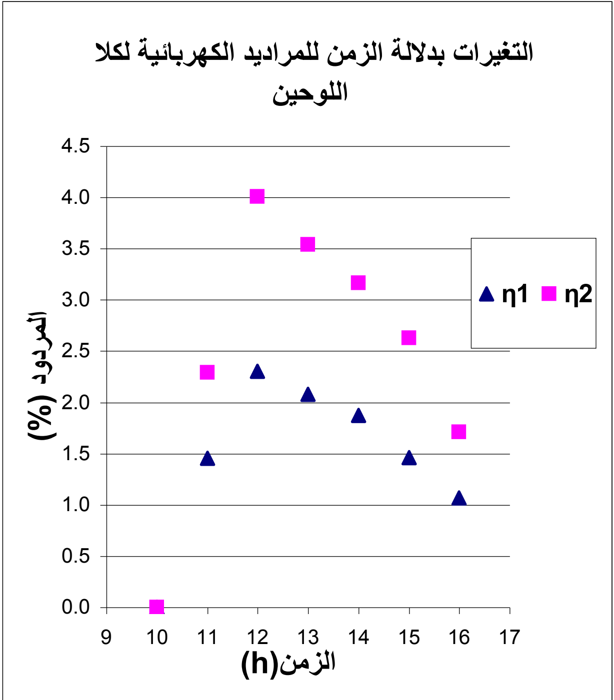


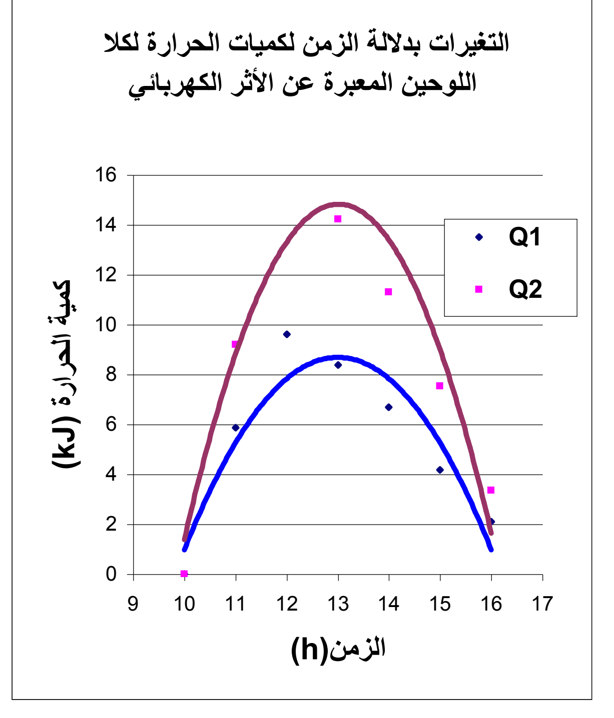
الجدول (2-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 06/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	27.0	27.0	27.0	0.00	0.00	0.00	875.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	28.4	29.2	28.2	5.86	9.21	7.53	985.48	1.46	2.29	36.36	4.16	65.00
12	30.7	33.2	29.9	9.63	16.74	10.67	1023.12	2.31	4.01	42.50	6.56	64.89
13	32.7	36.6	31.3	8.37	14.23	8.79	985.48	2.08	3.54	41.18	5.72	63.64
14	34.3	39.3	32.3	6.70	11.30	6.28	875.50	1.87	3.16	40.74	4.92	61.90
15	35.3	41.1	33.0	4.19	7.53	4.40	702.02	1.46	2.63	44.44	4.16	64.91
16	35.8	41.9	33.1	2.09	3.35	0.63	480.33	1.07	1.71	37.50	2.03	47.37
				36.84	62.37	38.30						



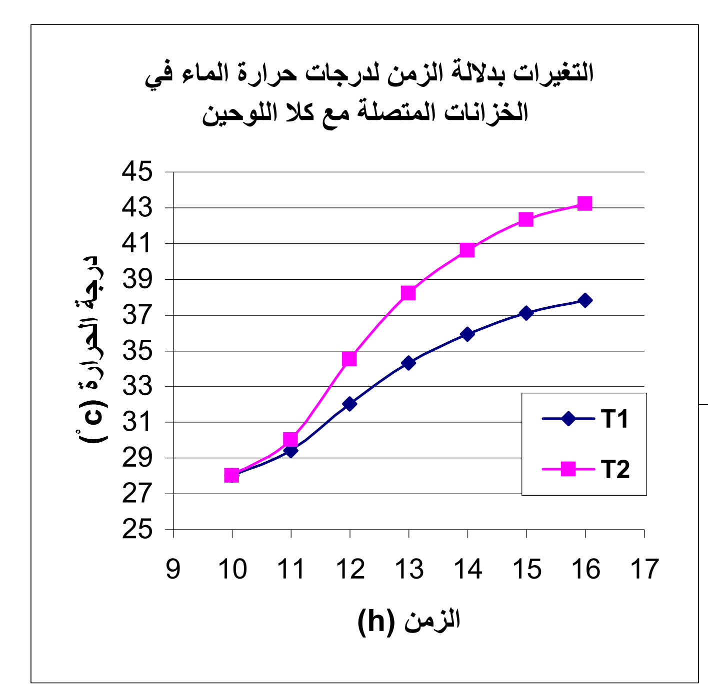


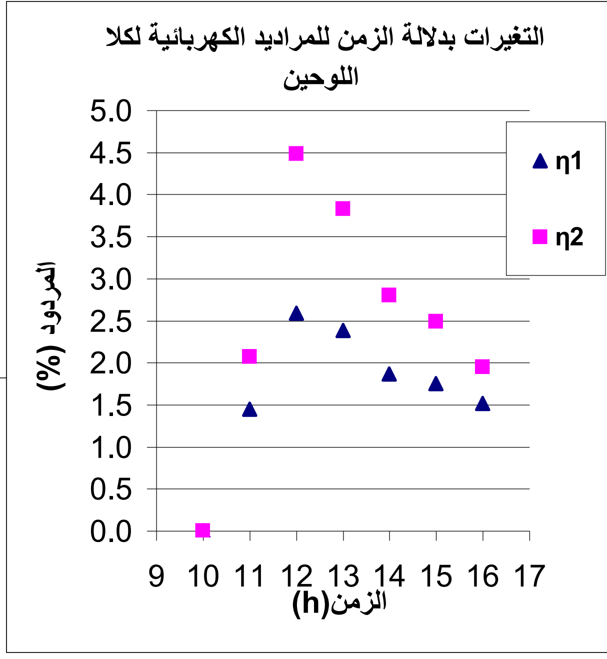


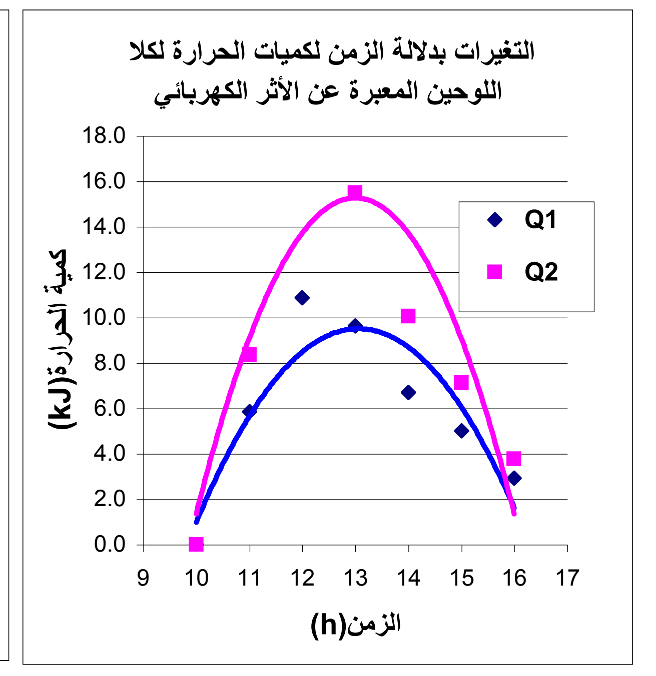
الجدول (3-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 18/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	28.0	28.0	28.0	0.00	0.00	0.00	878.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	29.4	30.0	29.6	5.86	8.37	10.05	991.32	1.45	2.07	30.00	4.55	68.18
12	32.0	34.5	31.5	10.88	18.84	11.93	1029.75	2.59	4.48	42.22	7.32	64.63
13	34.3	38.2	33.0	9.63	15.49	9.42	991.32	2.38	3.83	37.84	6.15	61.34
14	35.9	40.6	33.8	6.70	10.05	5.02	878.96	1.87	2.80	33.33	4.20	55.56
15	37.1	42.3	34.3	5.02	7.12	3.14	701.50	1.75	2.48	29.41	3.58	51.02
16	37.8	43.2	34.6	2.93	3.77	1.57	474.14	1.51	1.95	22.22	2.76	45.10
				41.02	63.63	41.13						



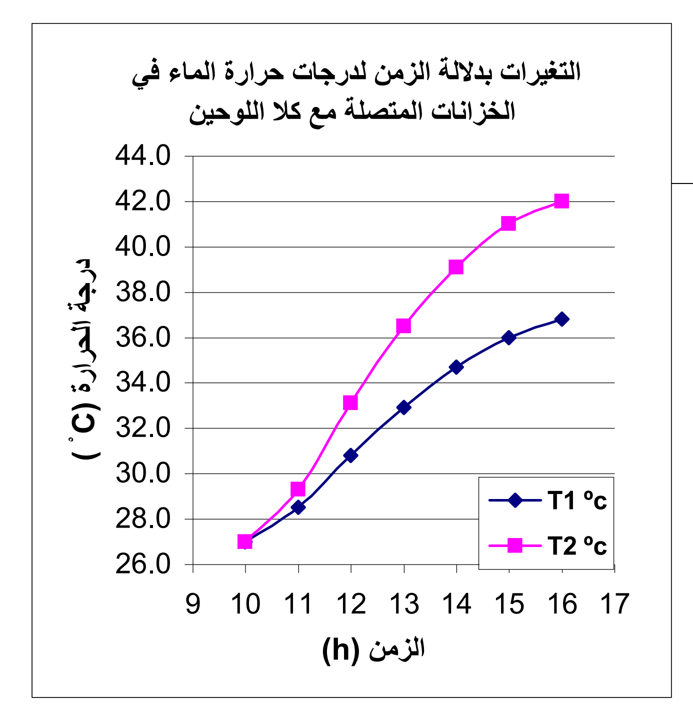


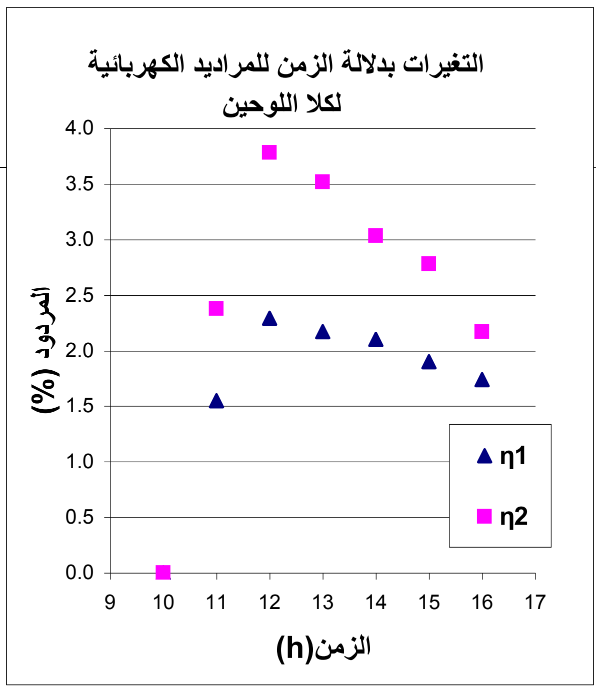


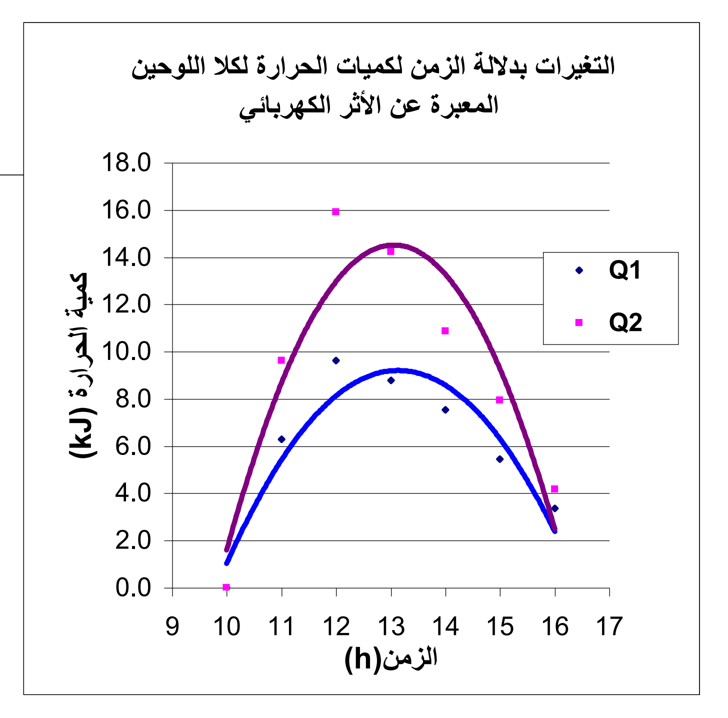
الجدول (4-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 20/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	27.0	27.0	27.0	0.00	0.00	0.00	878.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	28.5	29.3	27.8	6.28	9.63	5.02	991.66	1.55	2.38	34.78	3.62	57.14
12	30.8	33.1	29.7	9.63	15.91	11.93	1030.21	2.29	3.78	39.47	6.62	65.41
13	32.9	36.5	31.4	8.79	14.23	10.67	991.66	2.17	3.52	38.24	6.15	64.71
14	34.7	39.1	32.6	7.53	10.88	7.53	878.93	2.10	3.03	30.77	5.13	59.09
15	36.0	41.0	33.2	5.44	7.95	3.77	700.83	1.90	2.78	31.58	4.10	53.57
16	36.8	42.0	33.5	3.35	4.19	1.88	472.54	1.74	2.17	20.00	3.15	44.83
				41.02	62.79	40.81						



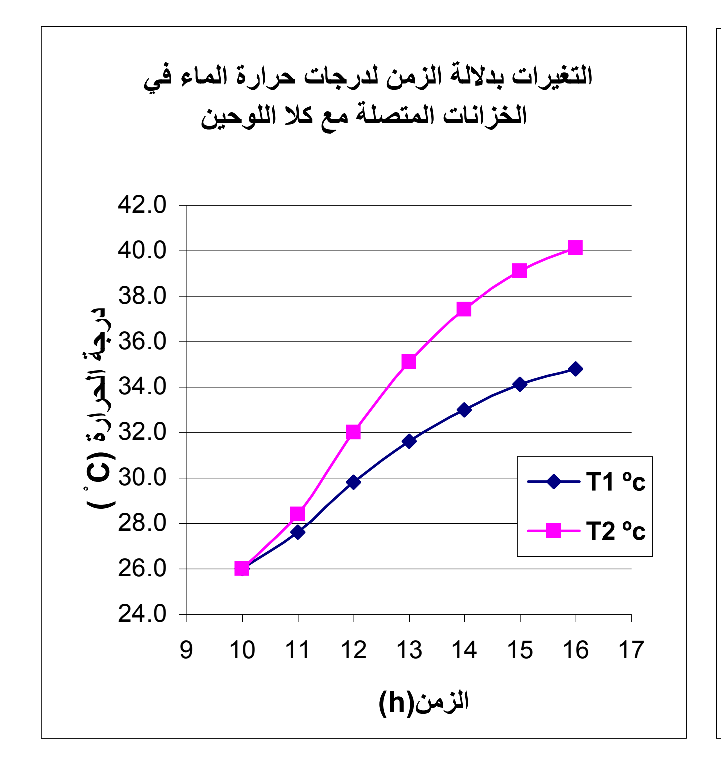


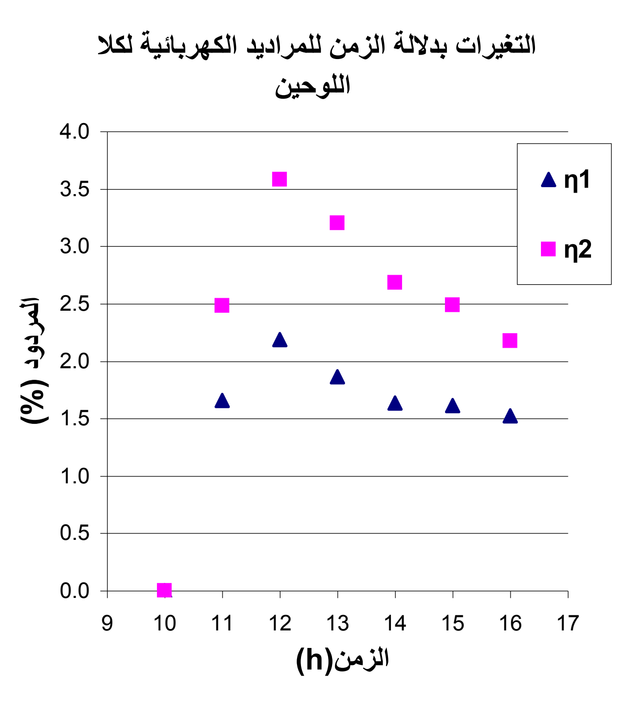


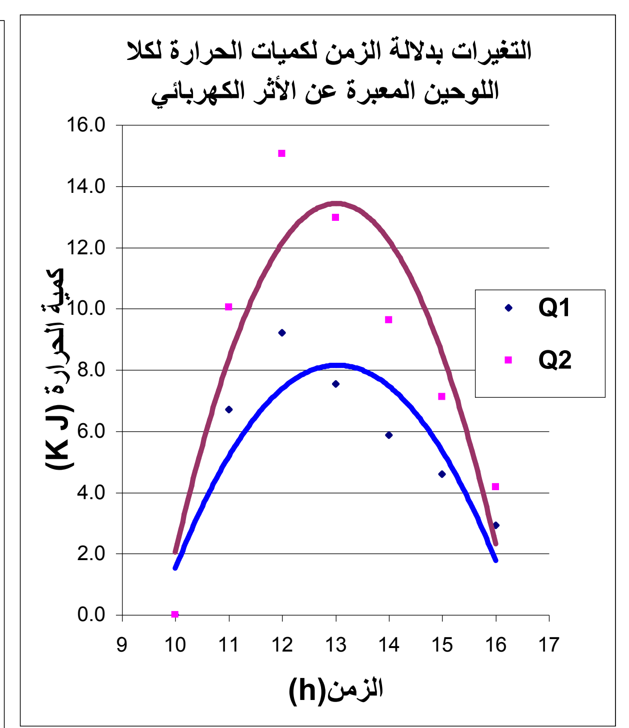
الجدول (5-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 22/09/2009

الساعة	T_1	T_2	T_2'	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	26.0	26.0	26.0	0.00	0.00	0.00	878.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	27.6	28.4	27.3	6.70	10.05	8.16	991.78	1.65	2.48	33.33	4.50	63.22
12	29.8	32.0	29.2	9.21	15.07	11.93	1030.45	2.19	3.58	38.89	6.42	65.89
13	31.6	35.1	30.4	7.53	12.98	7.53	991.78	1.86	3.21	41.94	5.07	63.27
14	33.0	37.4	31.3	5.86	9.63	5.65	878.70	1.63	2.68	39.13	4.26	61.64
15	34.1	39.1	32.0	4.60	7.12	4.40	699.98	1.61	2.49	35.29	4.03	60.00
16	34.8	40.1	32.4	2.93	4.19	2.51	470.76	1.52	2.18	30.00	3.48	56.25
				36.84	59.02	40.19						



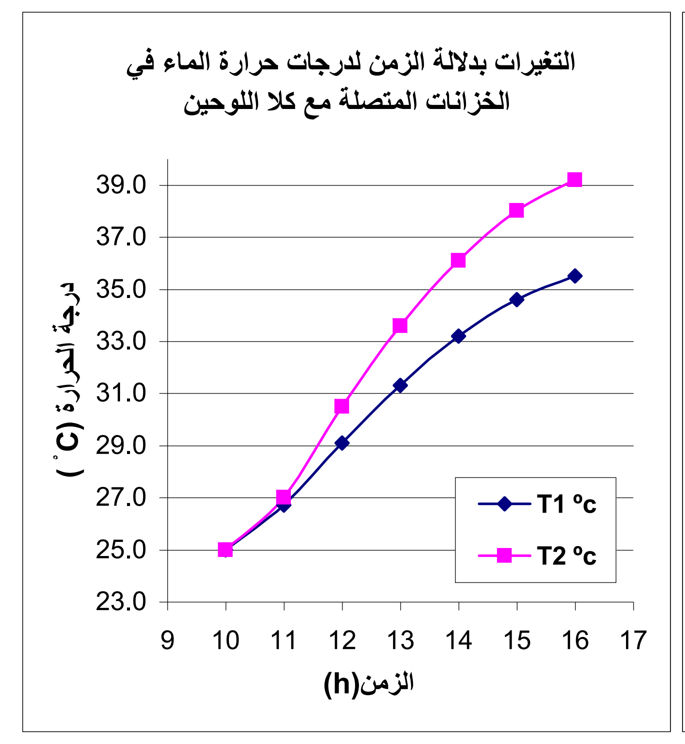


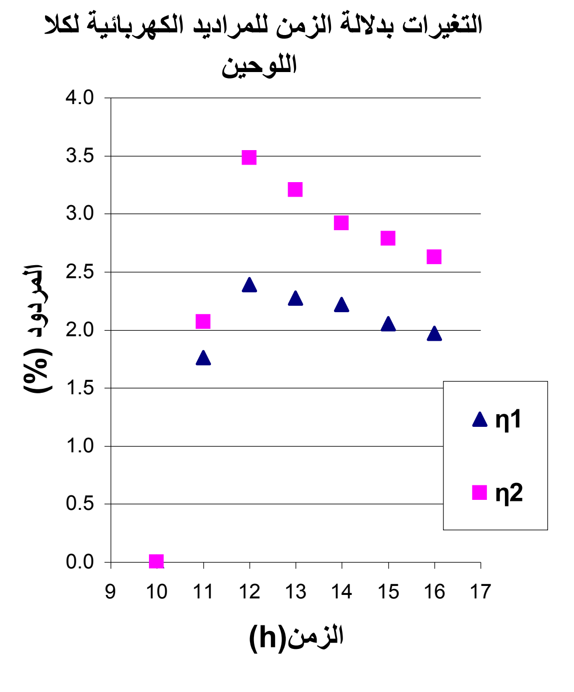


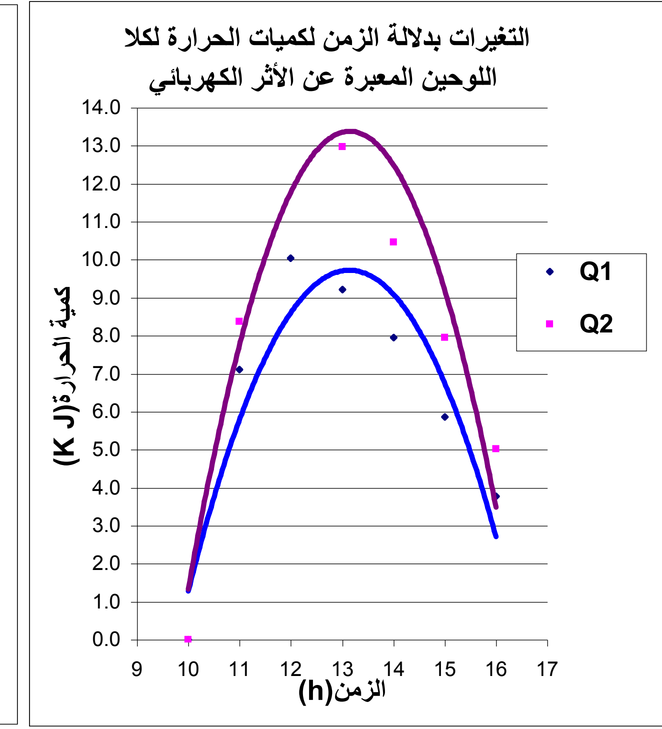
الجدول (6-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 24/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	25.0	25.0	25.0	0.00	0.00	0.00	878.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	26.7	27.0	26.3	7.12	8.37	8.16	991.69	1.76	2.07	15.00	4.08	56.96
12	29.1	30.5	28.2	10.05	14.65	11.93	1030.47	2.39	3.48	31.43	6.32	62.20
13	31.3	33.6	29.6	9.21	12.98	8.79	991.69	2.27	3.21	29.03	5.38	57.69
14	33.2	36.1	30.6	7.95	10.47	5.97	878.26	2.22	2.92	24.00	4.58	51.59
15	34.6	38.0	31.1	5.86	7.95	3.45	698.94	2.05	2.79	26.32	4.00	48.62
16	35.5	39.2	31.3	3.77	5.02	1.26	468.80	1.97	2.62	25.00	3.28	40.00
				43.95	59.44	39.56						



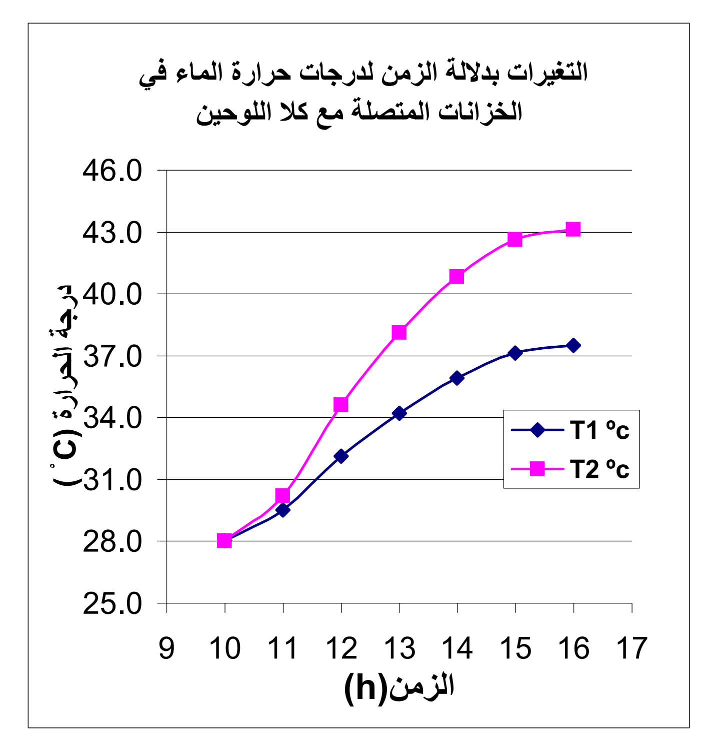


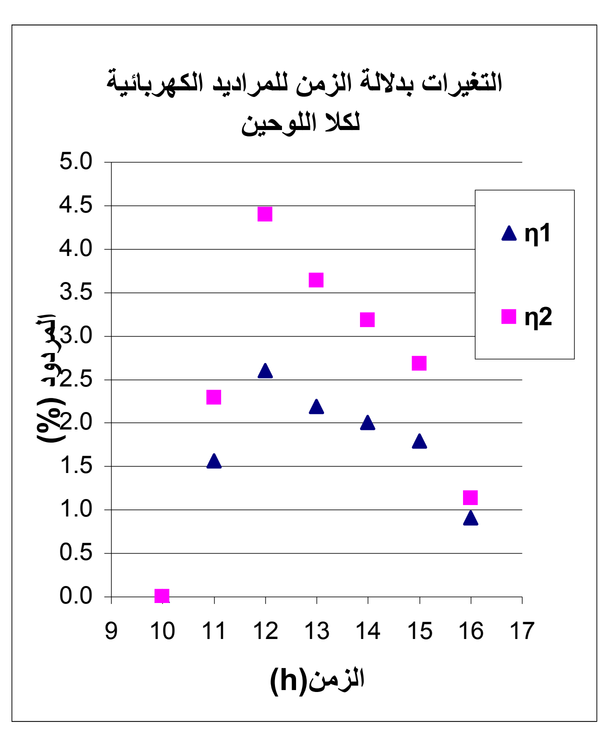


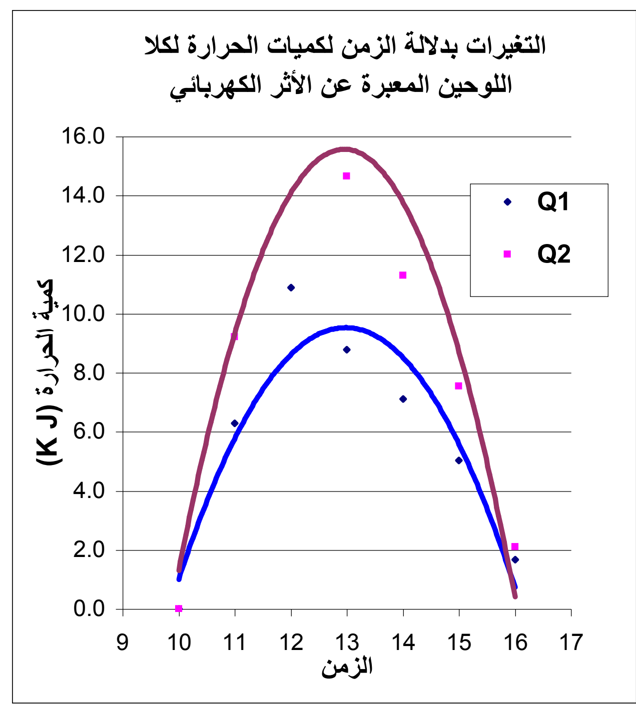
الجدول (7-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 15/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	28.0	28.0	28.0	0.00	0.00	0.00	870.814	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	29.5	30.2	29.3	6.28	9.21	8.16	986.057	1.56	2.29	31.82	4.32	63.86
12	32.1	34.6	31.5	10.88	18.42	13.81	1025.42	2.60	4.40	40.91	7.70	66.23
13	34.2	38.1	33.0	8.79	14.65	9.42	986.057	2.18	3.64	40.00	5.98	63.48
14	35.9	40.8	34.0	7.12	11.30	5.97	870.814	2.00	3.18	37.04	4.86	58.79
15	37.1	42.6	34.6	5.02	7.53	4.08	688.213	1.79	2.68	33.33	4.13	56.76
16	37.5	43.1	34.8	1.67	2.09	1.38	452.686	0.91	1.13	20.00	1.88	51.81
				39.77	63.21	42.82						



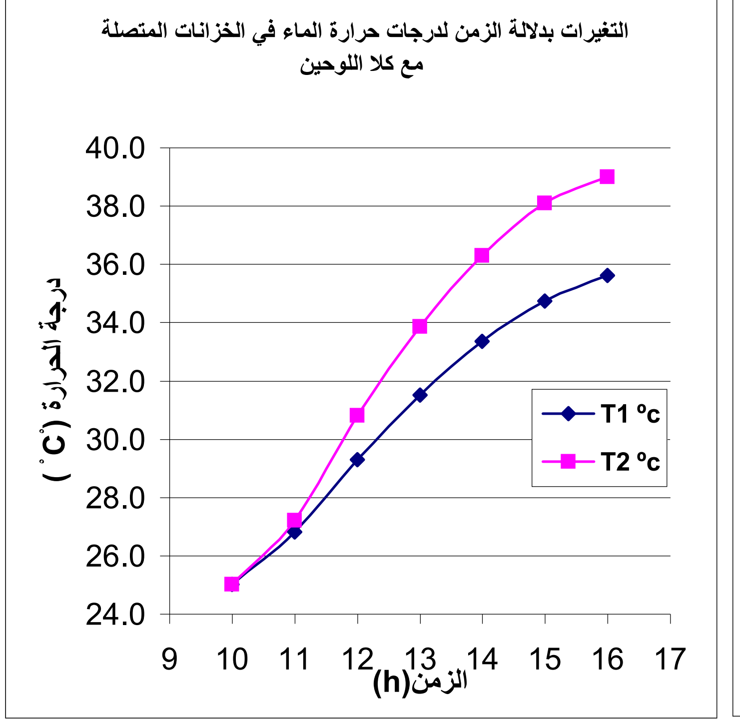


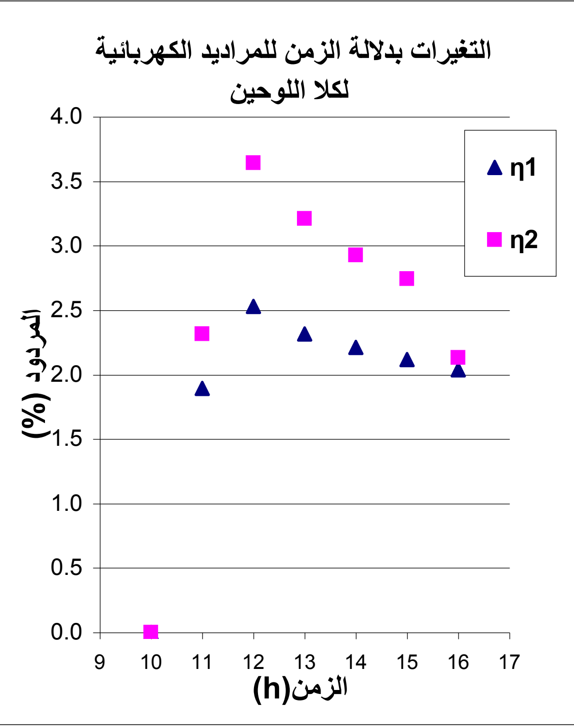


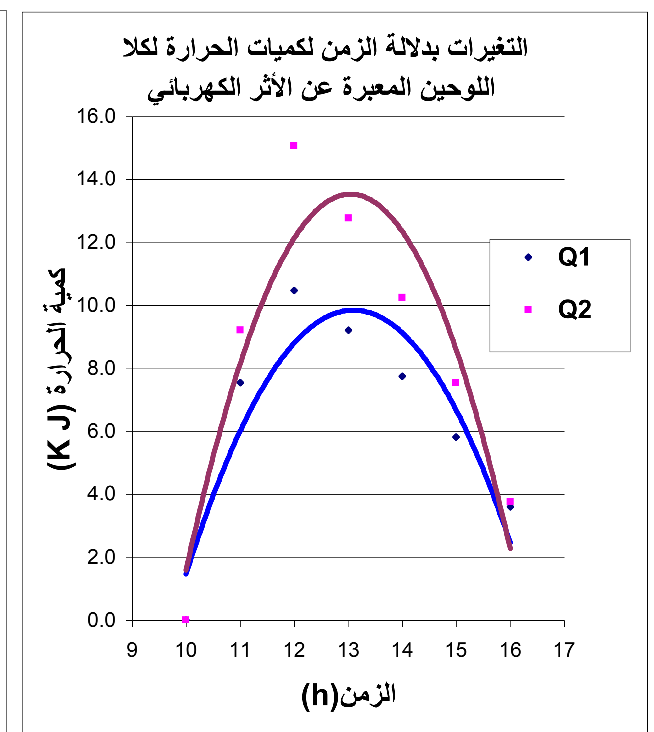
الجدول (8-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 25/09/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	ºc	ºc	ºc	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	25.0	25.0	25.0	0.00	0.00	0.00	857.887	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	26.8	27.2	26.3	7.53	9.21	8.16	974.24	1.89	2.32	18.18	4.37	56.63
12	29.3	30.8	28.4	10.47	15.07	13.19	1013.94	2.53	3.64	30.56	6.83	62.96
13	31.5	33.9	29.8	9.21	12.77	8.79	974.24	2.32	3.21	27.87	5.42	57.28
14	33.4	36.3	30.8	7.74	10.26	6.28	857.887	2.21	2.93	24.49	4.72	53.16
15	34.7	38.1	31.5	5.82	7.53	4.40	673.034	2.12	2.74	22.78	4.34	51.23
16	35.6	39.0	31.7	3.60	3.77	1.26	433.133	2.04	2.13	4.44	2.84	28.33
				44.37	58.60	42.07						



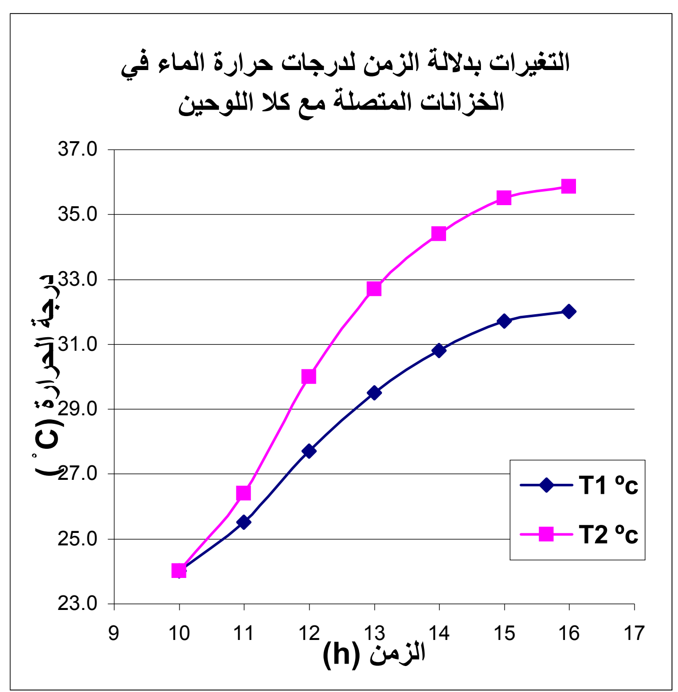


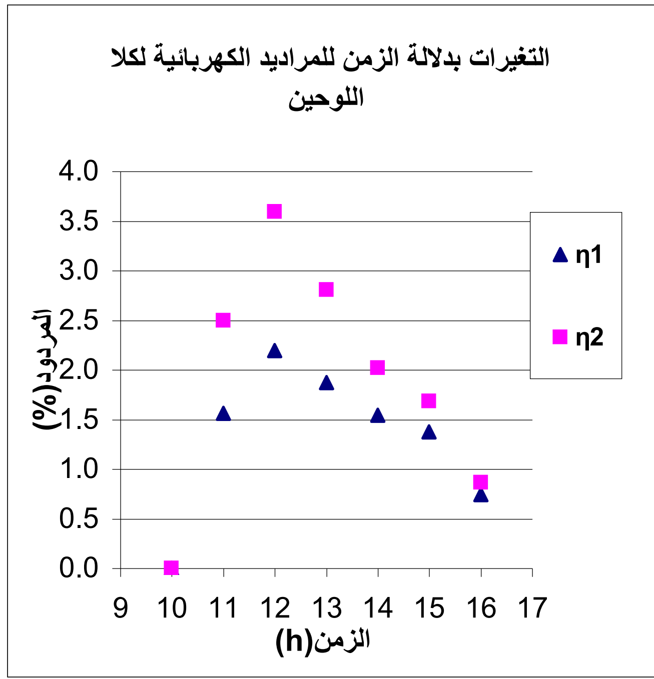


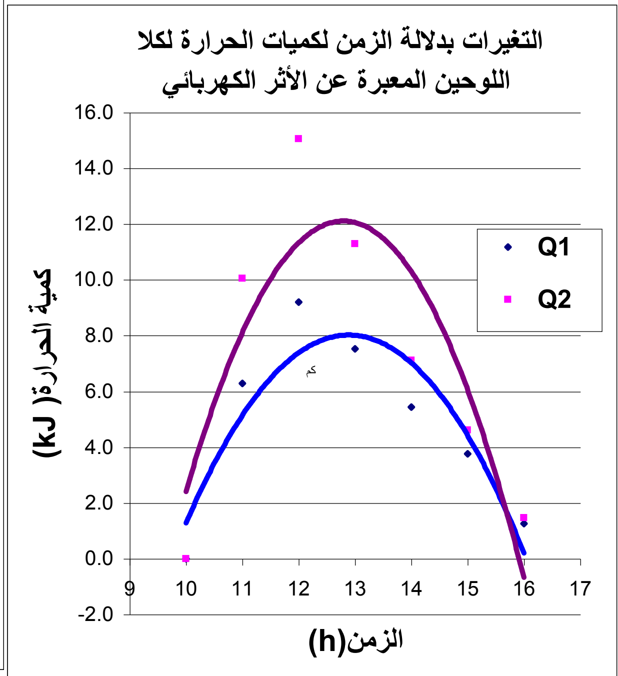
الجدول (9-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 10/10/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	24.0	24.0	24.0	0.00	0.00	0.00	864.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	25.5	26.4	25.1	6.28	10.05	6.91	985.649	1.56	2.50	37.50	4.21	62.96
12	27.7	30.0	27.0	9.21	15.07	11.93	1026.96	2.20	3.59	38.89	6.44	65.89
13	29.5	32.7	28.2	7.53	11.30	7.53	985.649	1.87	2.81	33.33	4.68	60.00
14	30.8	34.4	29.2	5.44	7.12	6.28	864.36	1.54	2.02	23.53	3.80	59.37
15	31.7	35.5	29.6	3.77	4.60	2.51	670.653	1.38	1.68	18.18	2.60	47.06
16	32.0	35.9	29.7	1.26	1.47	0.75	415.908	0.74	0.86	14.29	1.31	43.40
				33.49	49.60	35.92						



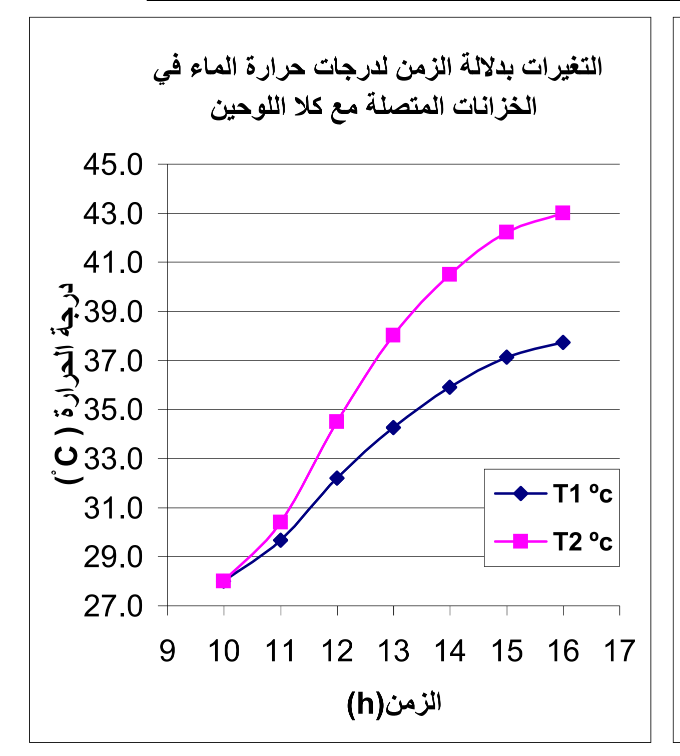


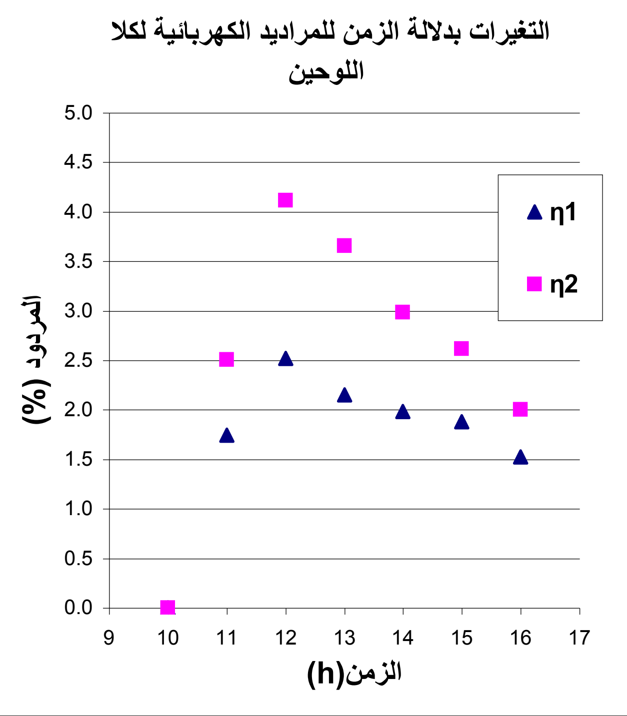


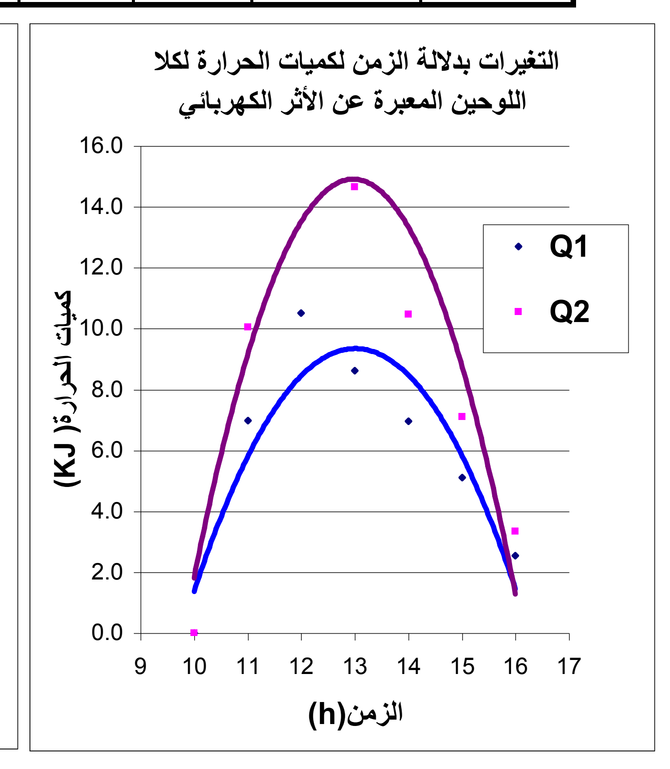
الجدول (4-10) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 12/10/2009

الساعة	T_1 °c	T_2 °c	$T_{2'}$ °c	Q_1 kJ	Q_2 kJ	Qt kJ	Ht W/m²	η_1 %	η_2 %	$\Delta\eta$ %	η_{tot} %	$\Delta\eta_{tot}$ %
10	28.0	28.0	28.0	0.00	0.00	0.00	859.494	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	29.7	30.4	29.2	6.99	10.05	7.53	980.853	1.75	2.51	30.42	4.39	60.24
12	32.2	34.5	31.1	10.51	17.16	11.93	1022.17	2.52	4.11	38.78	6.97	63.88
13	34.2	38.0	32.3	8.62	14.65	7.53	980.853	2.15	3.66	41.14	5.54	61.13
14	35.9	40.5	33.2	6.95	10.47	5.65	859.494	1.98	2.98	33.60	4.59	56.88
15	37.1	42.2	33.8	5.11	7.12	3.77	665.503	1.88	2.62	28.24	4.01	53.08
16	37.7	43.0	34.0	2.55	3.35	1.26	409.792	1.53	2.00	23.75	2.75	44.55
				40.73	62.79	37.67						



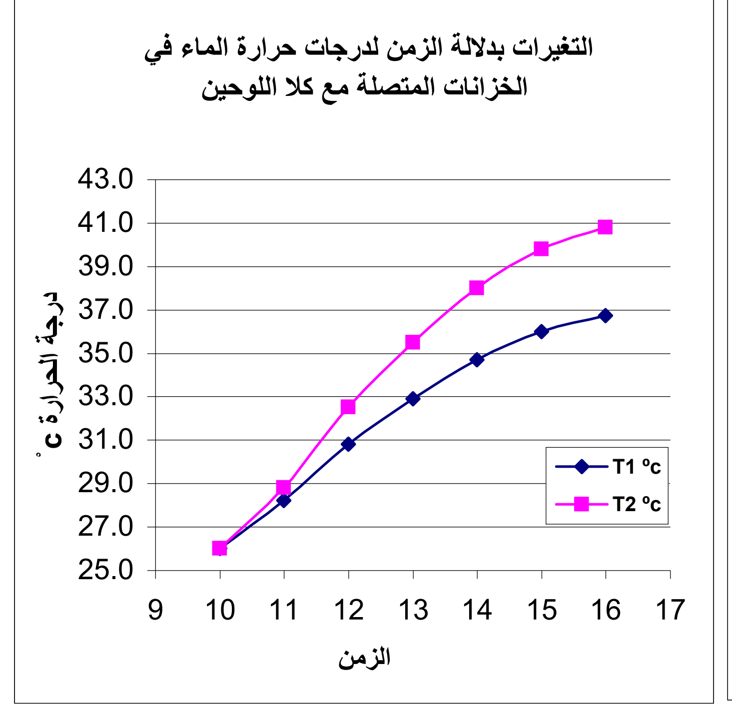


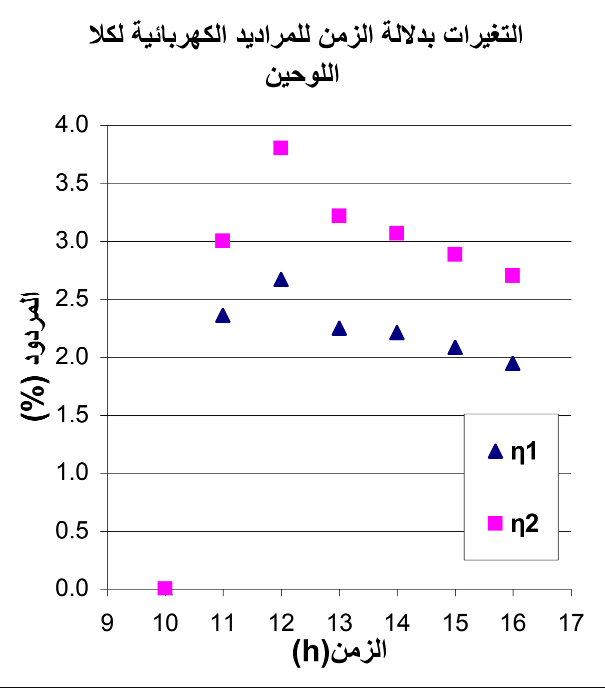


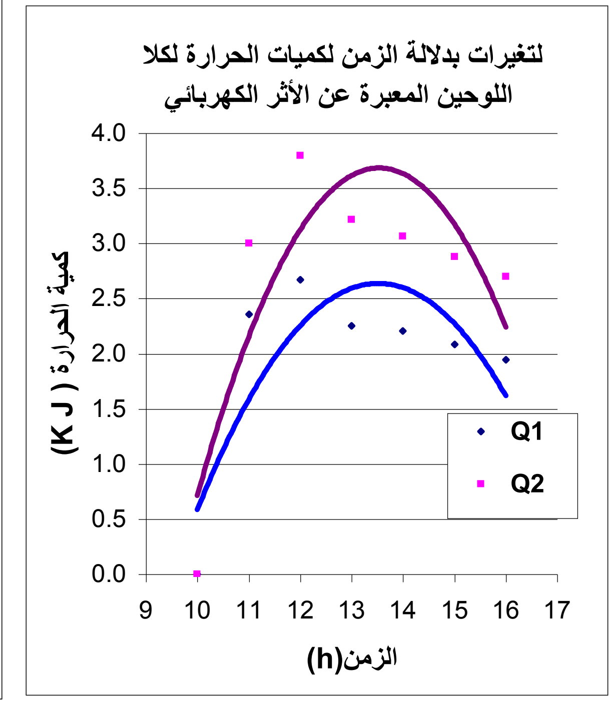
الجدول (4-11) نتائج التبريد المائي على المنظومة الأولى

لليوم: 21/10/2009

الساعة	T_1	T_2	$T_{2'}$	Q_1	Q_2	Qt	Ht	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	°c	°c	°c	kJ	kJ	kJ	W/m²	%	%	%	%	%
10	26.0	26.0	26.0	0.00	0.00	0.00	835.577	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	28.2	28.8	27.4	9.21	11.72	8.79	957.15	2.36	3.00	21.43	5.25	55.10
12	30.8	32.5	29.2	10.88	15.49	11.49	998.471	2.67	3.80	29.73	6.62	59.66
13	32.9	35.5	30.4	8.79	12.56	7.35	957.15	2.25	3.21	30.00	5.09	55.84
14	34.7	38.0	31.4	7.53	10.47	5.97	835.577	2.21	3.07	28.00	4.82	54.14
15	36.0	39.8	32.0	5.44	7.53	4.08	640.35	2.08	2.88	27.78	4.44	53.15
16	36.7	40.8	32.4	3.01	4.19	2.20	379.859	1.94	2.70	28.00	4.12	52.79
				44.87	61.95	39.87						



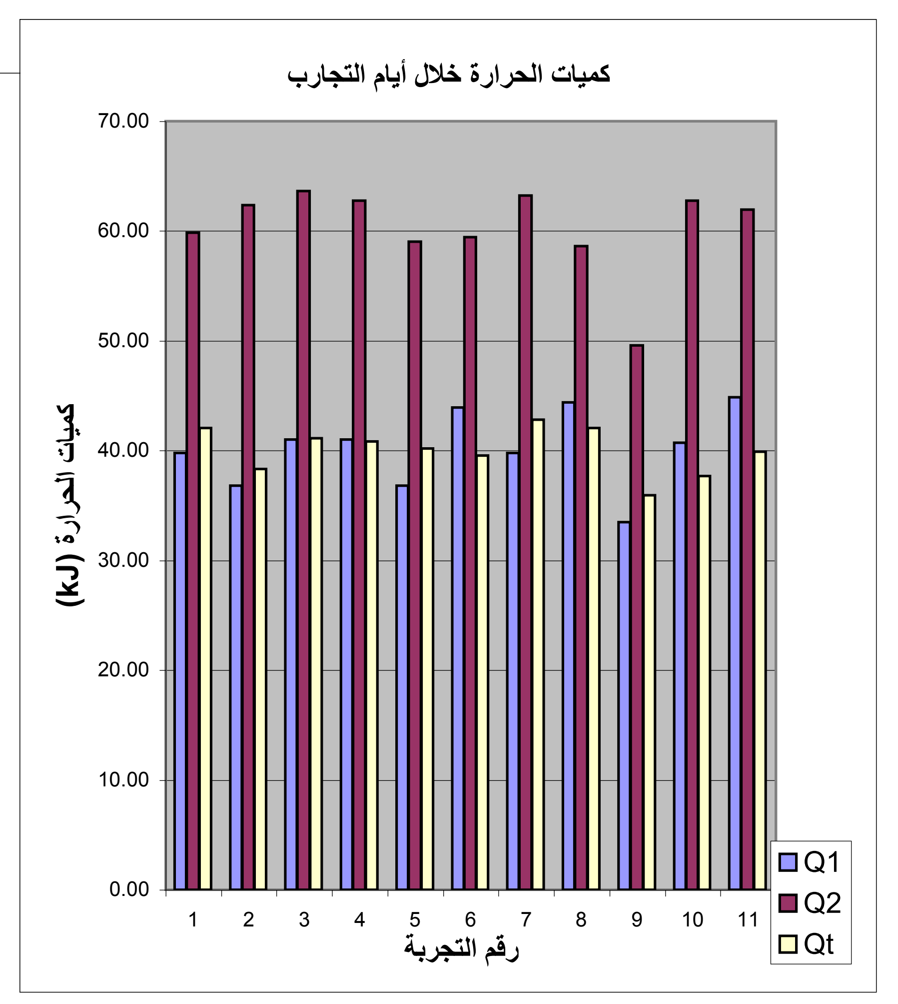




الجدول (4-12)

نتائج حساب كميات الحرارة عند استخدام التبريد المائي على المنظومة الأولى خلال أيام التجارب

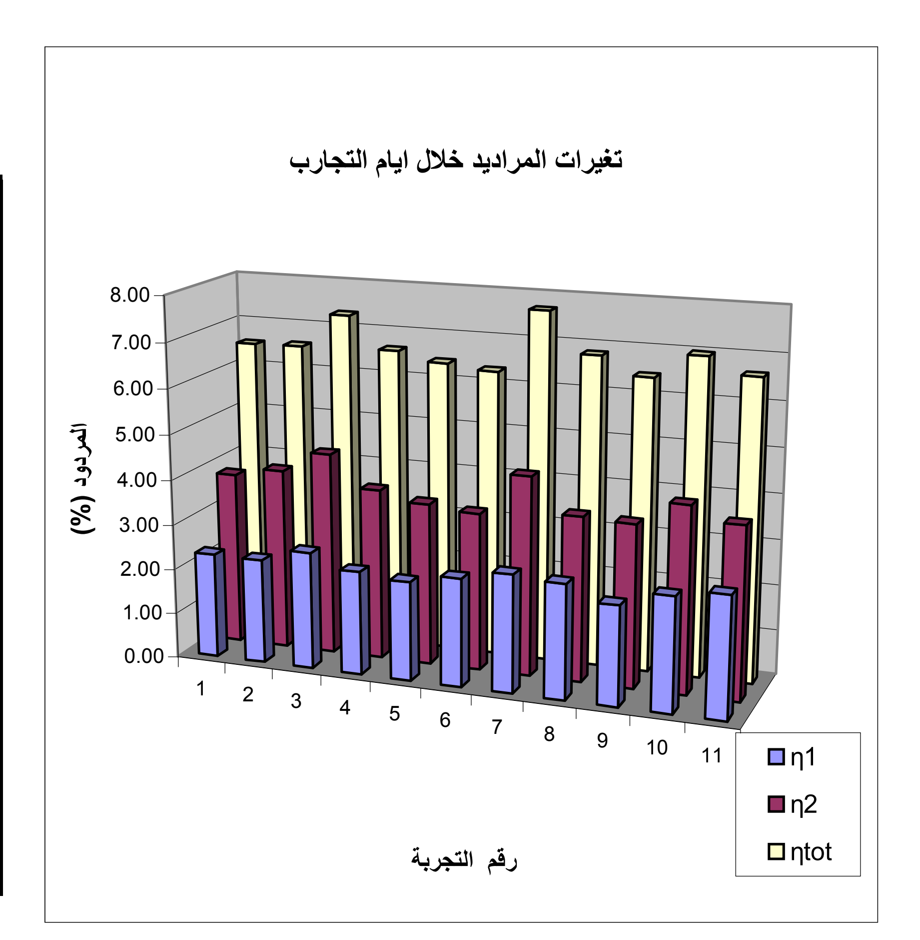
كميات الحرارة	Q_1	Q_2	ΔQ	Qt	$\Delta\eta_{tot}$	رقم
اليوم	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	التجربة
02/09/2009	39.77	59.86	20.09	42.07	62.16	1
06/09/2009	36.84	62.37	25.53	38.30	63.84	2
18/09/2009	41.02	63.63	22.60	41.13	63.73	3
20/09/2009	41.02	62.79	21.77	40.81	62.58	4
22/09/2009	36.84	59.02	22.19	40.19	62.37	5
24/09/2009	43.95	59.44	15.49	39.56	55.05	6
15/09/2009	39.77	63.21	23.44	42.82	66.26	7
25/09/2009	44.37	58.60	14.23	42.07	56.30	8
10/10/2009	33.49	49.60	16.12	35.92	52.03	9
12/10/2009	40.73	62.79	22.06	37.67	59.73	10
21/10/2009	44.87	61.95	17.08	39.87	56.95	11



الجدول (4-13)

نتائج حساب المراديدعند استخدام التبريد المائي على المنظومة الأولى خلال أيام التجارب

المراديد	η_1	η_2	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$	رقم
اليوم	%	%	%	%	%	التجربة
02/09/2009	2.31	3.82	39.47	6.54	64.62	1
06/09/2009	2.31	4.01	42.50	6.56	64.89	2
18/09/2009	2.59	4.48	42.22	7.32	64.63	3
20/09/2009	2.29	3.78	39.47	6.62	65.41	4
22/09/2009	2.19	3.58	38.89	6.42	65.89	5
24/09/2009	2.39	3.48	31.43	6.32	62.20	6
15/09/2009	2.60	4.40	40.91	7.70	66.23	7
25/09/2009	2.53	3.64	30.56	6.83	62.96	8
10/10/2009	2.20	3.59	38.89	6.44	65.89	9
12/10/2009	2.52	4.11	38.78	6.97	63.88	10
21/10/2009	2.67	3.80	29.73	6.62	59.66	11



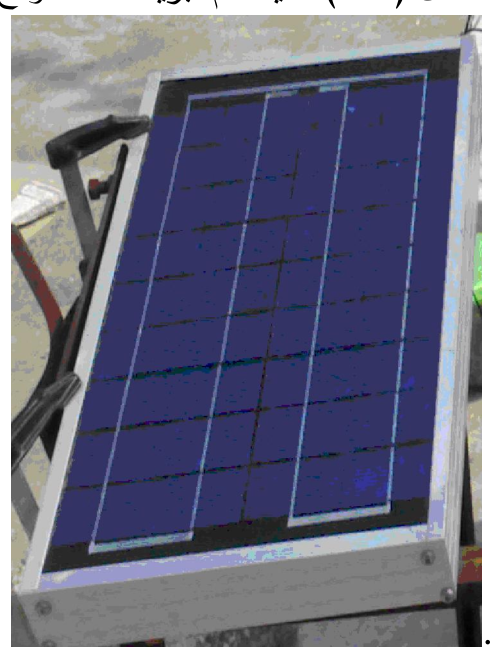
4-6-2 التجارب المنجزة على المنظومة الثانية:

أُجري هذا النوع من التجارب على المنظومة الثانية ذات الخلايا الألمانية الصنع وتضمنت استخدام تقنيات مختلفة من التبريد لسطح الألواح الفوتوفولتية (مائي، هوائي، مائي+هوائي).

تتألف المنظومة من التجهيزات التالية:

أ- الألواح الفوتوفولتية:

استُخدم في المنظومة لوحان فوتوفولتيان أبعاد كل منهما (40cm×25cm) تمّ وضعهما على حوامل معدنية يمكن تغيير زوايا ميلها عن السطح الأفقي يدوياً. تتألف الألواح من مجموعة من الخلايا من النوع السيليكوني المتعدد البلورات كما في الشكل (4-3)، حيث تمّ تبريد أحد الألواح وبقي الآخر بدون تبريد.



الشكل (4-3) أحد الألواح الفوتوفولتية للمنظومة الثانية

أما مواصفات هذه الألواح فيظهرها الجدول التالي (4-14) :

الجدول (4-14) مواصفات الألواح الفوتوفولتية المستخدمة في المنظومة الثانية

Solar Charge Controller	
System voltage	12 V
Max Power Voltage(V_{mp})	17.3 V
Max Power current (I_{mp})	0 .58 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	21.7 V
Short Circuit Current(I_{SC})	0.64 A
Peak Power	10 W

Operating temperature	-20 ~ 50
Fill Factor	0.72
Always at Stander Test Condition [1000 w/m²,25ºC,1.5Am]	
Made in Germany	

ب- أجهزة القياس والحمولات المختلفة:

تضمّن الجهاز التجريبي، ولكل لوح أجهزة قياس للجهد وللتيار الكهربائي واستُخدمت حساسات لقياس درجة حرارة سطح اللوح ، كما أُستخدمت بطاريات جافة بجهد (6V) لتخزين التيار الكهربائي المتولد من الألواح خلال ساعات العمل، كما أُستخدمت لمبات صغيرة لتفريغ البطاريات بعد الانتهاء من التجارب .كما في الشكل (4-4).



الشكل (4-4) أجهزة القياس المختلفة وبعض الحمولات المستخدمة في الجهاز المختبر.

ت- أجهزة تخص اللوح المبرّد:

- عندما أُستخدم التبريد المائي كانت دارة التبريد مكونة من ما يأتي:

☒ مبادل حراري يتألف من مجموعة من الأنابيب الصاعدة وأنبوبين مجمعين أحدهما علوي والآخر سفلي، وجميع هذه الأنابيب مصنوعة من الألمنيوم و تتوضع بينها زعانف نحاسية (مبرد سيارة) كما في الشكل (4-5). يتوضع هذا المبادل الحراري المزعنف على السطح الخلفي للوح الفوتوفولتي المراد تبريده مباشرةً في حالة التبريد المائي.



الشكل (4-5) المبادل المزعنف وطريقة توضعه على السطح الأسفل لـــ اللوح الفوتوفولتي.

- ☒ خزانات ماء معزولة من نوع ترمس بسعة (4 ليتر).
- ☒ مبادل حراري نحاسي يتوضع ضمن الخزان الحراري.
- ☒ أنابيب معزولة وتوصيلات وتوابع أخرى لتشكيل دارة يمر فيها الماء بين المبادل النحاسي المتوضع تحت اللوح الفوتوفولتي والخزان الحراري الذي يحوي الماء.
- ☒ أجهزة قياس درجات حرارة زئبقية ورقمية لقياس درجات حرارة الماء ضمن الخزان الحراري.

- o أما عند استخدام التبريد الهوائي فقد أُستعملت مروحة هوائية وأُزيلت دارة التبريد، حيث وُضعت المروحة تحت اللوح المُراد تبريده.

ج – توصيل مكوّنات المنظومة مع الألواح الفوتوفولتية:

بعد تركيب الألواح على حواملها وتحديد آلية توجيهها وإمالتها عن الأفق، تمّ توصيل مكوّنات المنظومة مع الألواح. ففي الجزء الخاص باللوح الذي لا يتم تبريده، فقد تمّ توصيل جهاز قياس شدة التيار الكهربائي على التسلسل مع اللوح الفوتوفولتي، أما مقياس الجهد فتم توصيله هو والبطارية على التفرع مع اللوح. لكن لابدّ من التنويه أنّه عند استخدام البطارية لابد من مراعاة جعل المسافة أصغرية بين اللوح الشمسي والبطارية لجعل هبوط الضغط أصغر ما يمكن، كما يجب الانتباه أن تكون البطاريات مركبة على سطح مستوي ومحمية من أشعة الشمس و مهوّاة بشكل جيد.

أما اللوح الذي يتم تبريده، فقد تمّ توصيله مع أجهزة قياس التيار الكهربائي وقياس الجهد والحمولة بطريقة مماثلة للأجهزة الموصولة مع اللوح غير المبرد.

تتكون دارة تبريد اللوح المبرّد تبريداً مائياً من المبادل الحراري المُزعنف المتوضع على السطح الأسفل للوح الفوتوفولتي، و حيث يتم توصيل هذا المبادل مع الخزان الحراري عن طريق أنابيب معزولة تماماً بحيث يشكلان دارة مغلقة يدور فيها الماء، ولابد من التنويه إلى أنّ طريقة توضّع المبادل المزعنف على السطح السفلي لـــلوح تمت بشكل يمكّن من إزالة هذا المبادل بسهولة وذلك بوساطة سكّة ينزلق عليها، بحيث يمكن إزالة المبادل ووضع مروحة تحت اللوح عند استخدام التبريد الهوائي لـــه، وفي هذه الحالة لا يكون هناك أي دور لدارة الماء.

4-6-2-1 تجارب التبريد المائي للمنظومة الثانية:

- **توصيف الجهاز التجريبي ومبدأ العمل :**

يمثل الشكل (4-6) مكونات المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي، حيث يظهر اللوح المُبرد وأجهزة القياس الموصولة به ودارة التبريد التابعة له، كما يظهر اللوح غير المُبرد و أجهزة القياس الموصولة به.



الشكل (4-6) مكونات المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي

يعتمد مبدأ التبريد المائي في هذه الحالة على وجود الدارة التي تحوي الماء والتي تتمثل- كما شرحنا في فقرة سابقة- بالمبادل الحراري المزعنف (انظر الشكل 4-5) الكائن على تلامس مع السطح السفلي لـــ اللوح وبالخزان الحراري ذي المُبادل الحراري المغمور وبالأنابيب الموصلة بينهما.

بنتيجة التلامس بين سطح المبادل المُزعنف والسطح السفلي للوح يسحب الماء الحرارة من اللوح، بعدها يذهب الماء الساخن من المبادل المزعنف عبر أنابيب معزولة إلى مبادل حراري نحاسي آخر موجود في

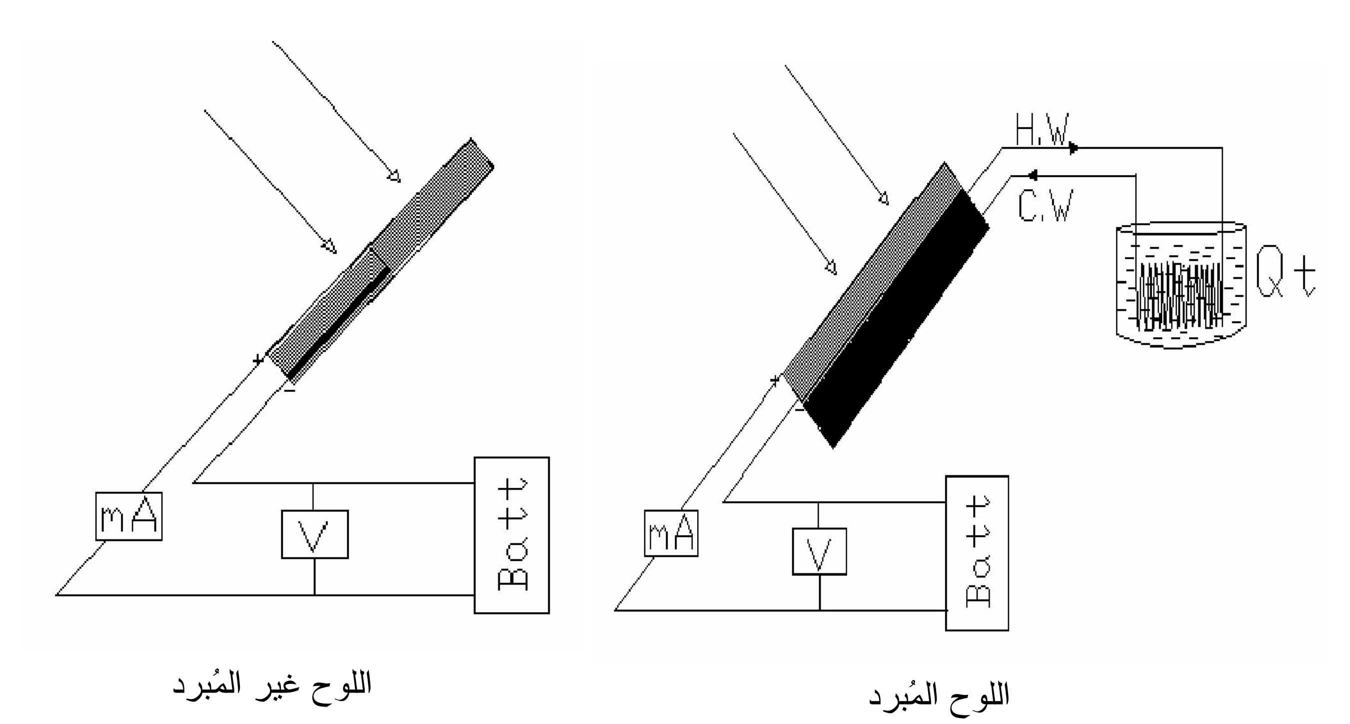
الخزان الحراري الحاوي على ماء مختلف عن ماء المبادل المزعنف (دارة التبريد دارة مغلقة). يحدث التبادل الحراري بينهما، فيؤدي إلى خفض درجة حرارة الماء المار في الدارة ورفع درجة حرارة الماء الموجود في الخزان الحراري (الترمس). يعود الماء البارد الموجود في الدارة، بعد فقدان حرارته، باتجاه المبادل المزعنف، بينما يتوضع ماء الخزان الساخن في الأعلى ويتجمع في القسم السفلي منه الماء البارد.

إنّ تبريد الماء لسطح اللوح الشمسي له فائدة مزدوجة وهي: زيادة استطاعة اللوح، ومن ثمّ زيادة مردوده الكهربائي، كما يمكن الاستفادة من الماء الساخن المتجمع في الخزان الحراري في تطبيقات حرارية متعددة (استخدمنا في تجربتنا حجم تجهيزات صغير، وبالتالي كانت كمية الماء الساخن في الخزان الحراري قليلة، ولكن بشكل عام يسمح استخدام تجهيزات على نطاق أكبر بالحصول على كميات كبيرة من الماء الساخن يمكن أن يكون لها دورٌ في تطبيقات حرارية هامة).

إنّ ما يهمنا في تجربتنا، هو رفع المردود الكهربائي للوح الفوتوفولتي ولو كان ذلك على حساب كمية الماء الساخنة الممكن الحصول عليها في الخزان الحراري. لذلك لم يتم عزل المبادل المتوضع بتلامس مع السطح الأسفل لـــ اللوح، بل تم وضع زعانف بين أنابيب هذه المبادل للمساعدة بتبريد اللوح خلال حركة الهواء عبرها. لكن، بشكل عام، وللحصول على كميات كبيرة من الماء الساخن في الخزان الحراري يجب عزل المبادل الذي يكون على تلامس مع سطح اللوح الفوتوفولتي بدون استخدام مثل هذه الزعانف.

- **مخطط العمل:**

يبين الشكل (4–7) مخطط العمل للمنظومة الثانية عند استخدام التبريد وبدونه:



اللوح غير المُبرد

اللوح المُبرد

الشكل (4–7) مخطط العمل يبين استخدام التبريد المائي للمنظومة الثانية

- **منهجية أخذ القياسات على المنظومات الفوتوفولتية المُختبرة:**

أُخذت القياسات الساعية الآتية (في كل التجارب المُنجزة على هذه المنظومة عند استخدام التبريد المائي) وهي: قياسات جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار دارة القصر لـــ اللوح الفوتوفولتي (I_{sc})، أما شدة الإشعاع الشمسي فلم يكن بالإمكان قياسها لعدم توفر جهاز قياس شدة الإشعاع الشمسي، بل تم حسابها اعتماداً على طريقة (ASHRAE) (المذكورة في الفصل الأول). كما تمّ قياس درجة حرارة الماء في الخزان الحراري ذي المُبادل المغمور. أما المقادير الساعية المحسوبة بدلالة المقادير السابقة، و التي تُستخدم لتقييم تحسّن أداء المنظومة فهي: الاستطاعة العظمى للألواح الكهربائية (P_{MPP}) المتمثلة بالعلاقة (4−7)، و المراديد الكهربائية (η) لكل منهما الممثلة بالعلاقة (4−8)، والزيادة النسبية في المردود الكهربائي لـــ اللوح ($\Delta\eta$) المعطاة بالعلاقة (4−9)، إضافةً لكمية الحرارة التي يكتسبها الماء في الخزان الحراري (Q_t) عند استخدام التبريد المائي والمعطاة بالعلاقة(4−1).كما يتم حساب المردود الكلي للمنظومة المبردة وفقاً للعلاقة (4−10)، وبعدها يتم حساب الزيادة النسبية في المردود الكلي لـــ اللوح ($\Delta\eta_{tot}$) وفقاً للعلاقة (4−11)

$$P_{MPP} = FF \times Isc \cdot Voc \qquad (7-4)$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A_c \cdot H_t} \qquad (8-4)$$

$$\Delta\eta = (\eta_2 - \eta_1) \times 100/\ \eta_2 \qquad (9-4)$$

$$Q_t = m \cdot C_p \cdot (T_{(t+\Delta t)} - T_{(t)})$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{MPP} + [Q_t \times 1000 / 3600]}{A_c \cdot H_t} \qquad (10-4)$$

$$\Delta\eta_{tot} = (\eta_{tot} - \eta_1) \times 100/\ \eta_{tot} \qquad (11-4)$$

حيث:

P_{MPP}: استطاعة اللوح الفوتوفولتي عند نقطة الاستطاعة العظمى [W]

I_{sc}: تيار دارة القصر للوح الفوتوفولتي [A]

V_{oc}: جهد الدارة المفتوحة للوح الفوتوفولتي [V]

A_C: مساحة اللوح الفوتوفولتي [m^2]

H_t: شدة الإشعاع الشمسي الإجمالي الساقط على اللوح الفوتوفولتي كل ساعة [W/m^2]

$\Delta\eta$: الزيادة النسبية في المردود الكهربائي للوح الفوتوفولتي [%]

η_2: المردود الكهربائي للوح المُبرد [%]

η_1: المردود الكهربائي للوح غير المُبرد [%]

Q_t: كمية الحرارة التي يكتسبها الماء في الخزان الحراري ذي المُبادل الحراري [kJ]

m: كتلة الماء المحتوى في الخزان الحراري وأُخذت في تجاربنا 1.5 liter

C_P: السعة الحرارية للماء [kJ/kg.c]

$T_{t+\Delta t}$: درجة حرارة الماء في الخزان الحراري عند الزمن $(t+\Delta t)$ [°C]

T_t: درجة حرارة في الخزان الحراري عند الزمن (t) [°C]

Δt: الفاصل الزمني ويساوي ساعة

η_{tot}: المردود الكلي للمنظومة في حال استخدام الأثر الكهربائي والحراري للمنظومة. [%]

$\Delta\eta_{tot}$: التغير النسبي في المردود الكلي. [%]

- **نتائج القياسات والحسابات:**

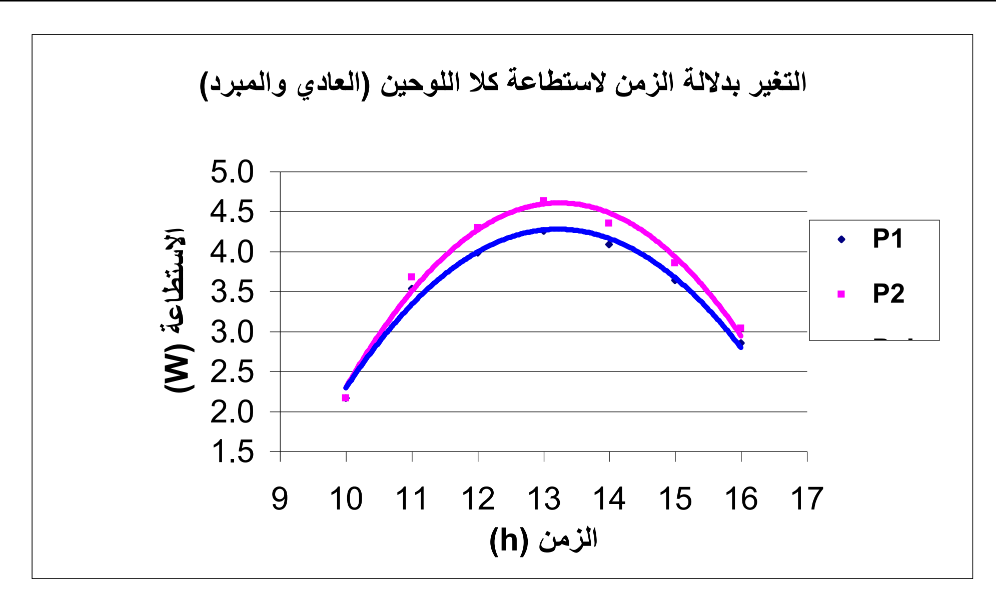
يمكن إجمال القيم الساعيّة المُقاسة والمُحسوبة للتجارب المُنجزة على المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي وخلال أيام مختلفة من خلال جداول تُعبر عن :

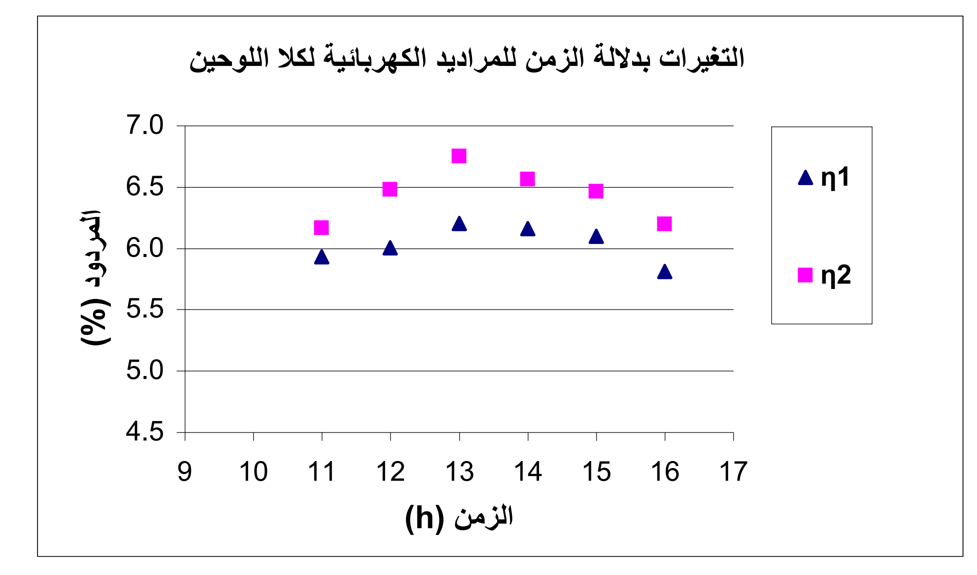
شدة الإشعاع الشمسي(H_t)، ولكل لوح: جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})، وتيار دارة القصر (I_{sc})، و الاستطاعة(P)،والمردود الكهربائي(η)– الرقم 1 يخص اللوح غير المُبرد ، والرقم 2 يخص اللوح المُبرد–والتغيرات النسبية في كل من الاستطاعة (ΔP)، والمردود الكهربائي ($\Delta\eta$).إضافة إلى درجة حرارة الماء في الخزان وكمية الحرارة التي يكتسبها الماء في الخزان الحراري (ذي المُبادل المغمور) من التبريد لسطح اللوح الفوتوفولتي(Q_t).

كما تضم الجداول المردود الكلي (η_{tot}) (عند الأخذ بعين الاعتبار الأثر الحراري والكهربائي للوح المُبرد)، بالإضافة إلى التغير النسبي الكلي للمردود ($\Delta\eta_{tot}$).

الجدول (4-15) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 18/06/2011

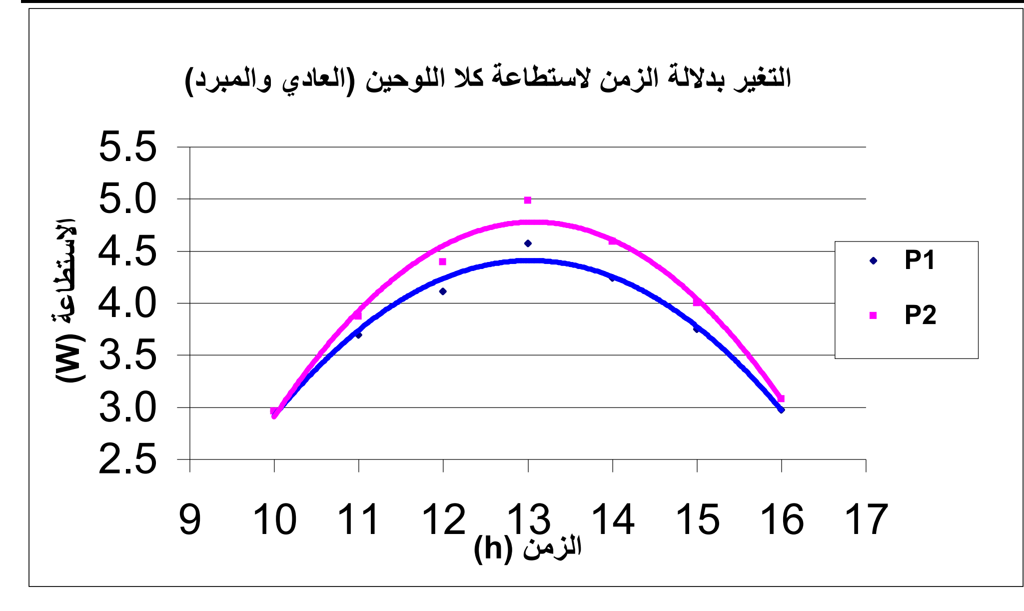
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مُبرد مائياً)				ΔP	Δη	درجة حرارة الماء في الخزان	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m^2	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%	°c	kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.25	49.09	10.0	300	2.17	4.42	10.0	300	2.17	4.42			23.7	0.00	4.42	0.00
11	851.94	59.64	10.2	480	3.54	5.93	10.7	477	3.68	6.16	3.82	3.82	24.5	5.02	8.50	30.28
12	947.44	66.32	10.4	530	3.98	6.00	11.4	524	4.30	6.48	7.39	7.39	25.5	6.28	9.11	34.12
13	980.13	68.61	10.6	560	4.25	6.20	11.6	554	4.63	6.75	8.13	8.13	26.6	7.03	9.60	35.39
14	947.44	66.32	10.5	540	4.09	6.16	11.3	535	4.35	6.56	6.09	6.09	27.7	6.91	9.45	34.82
15	851.94	59.64	10.1	500	3.64	6.10	10.8	496	3.85	6.46	5.63	5.63	28.5	4.90	8.74	30.26
16	701.25	49.09	9.9	400	2.85	5.81	10.2	414	3.04	6.19	6.22	6.22	29.1	3.77	8.33	30.24
														33.91		

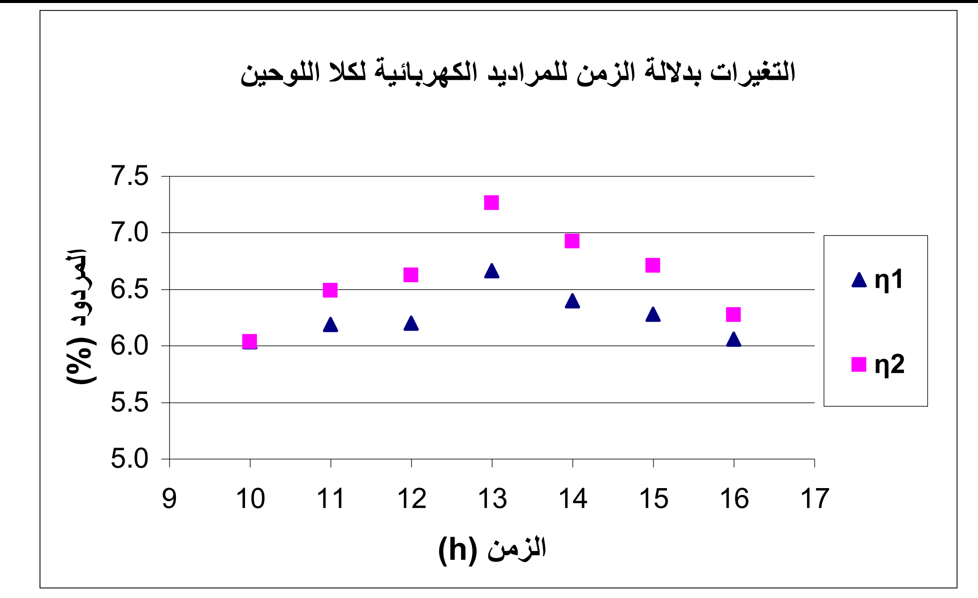




الجدول (16-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 19/06/2011

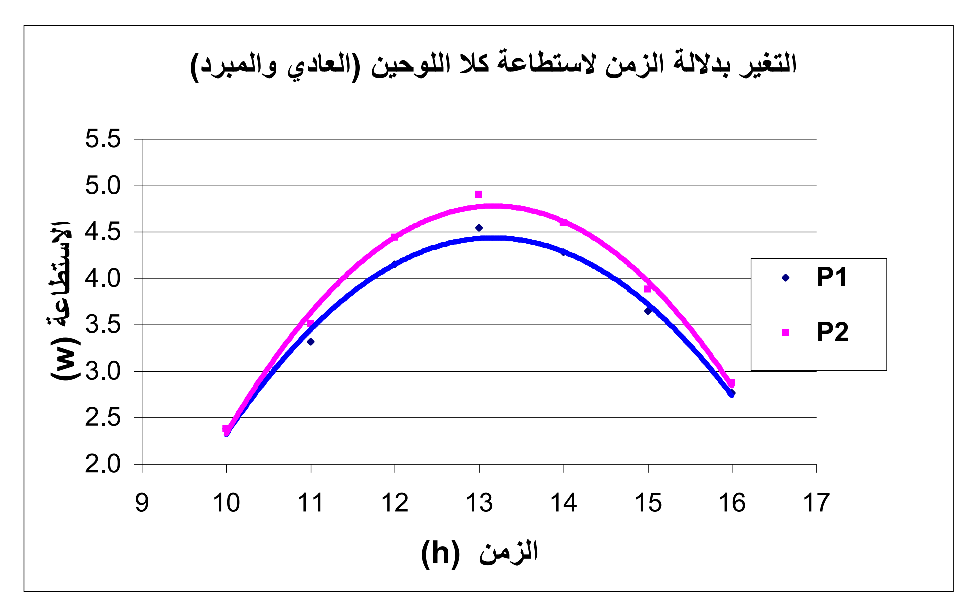
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مُبرد مائياً)				ΔP	$\Delta \eta$	درجة حرارة الماء في الخزان °c	Q_t	η_{tot}	$\Delta \eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.24	49.09	9.8	420	2.96	6.04	9.8	420	2.96	6.04			23.3	0.00	6.04	0.00
11	851.91	59.63	10.1	510	3.69	6.19	10.6	507	3.87	6.49	4.62	4.62	24.4	6.91	9.71	36.24
12	947.39	66.32	10.4	550	4.11	6.20	11.2	545	4.39	6.62	6.39	6.39	25.7	8.16	10.04	38.26
13	980.07	68.60	10.6	600	4.57	6.66	11.7	592	4.98	7.26	8.29	8.29	27.3	10.05	11.33	41.21
14	947.36	66.32	10.5	560	4.24	6.40	11.5	555	4.59	6.92	7.63	7.63	28.7	8.79	10.61	39.70
15	851.91	59.63	10.2	510	3.75	6.28	11.0	505	4.00	6.71	6.35	6.35	29.9	7.53	10.22	38.52
16	701.24	49.09	10.3	400	2.97	6.05	10.8	396	3.08	6.27	3.48	3.48	30.9	6.28	9.83	38.38
														47.72		

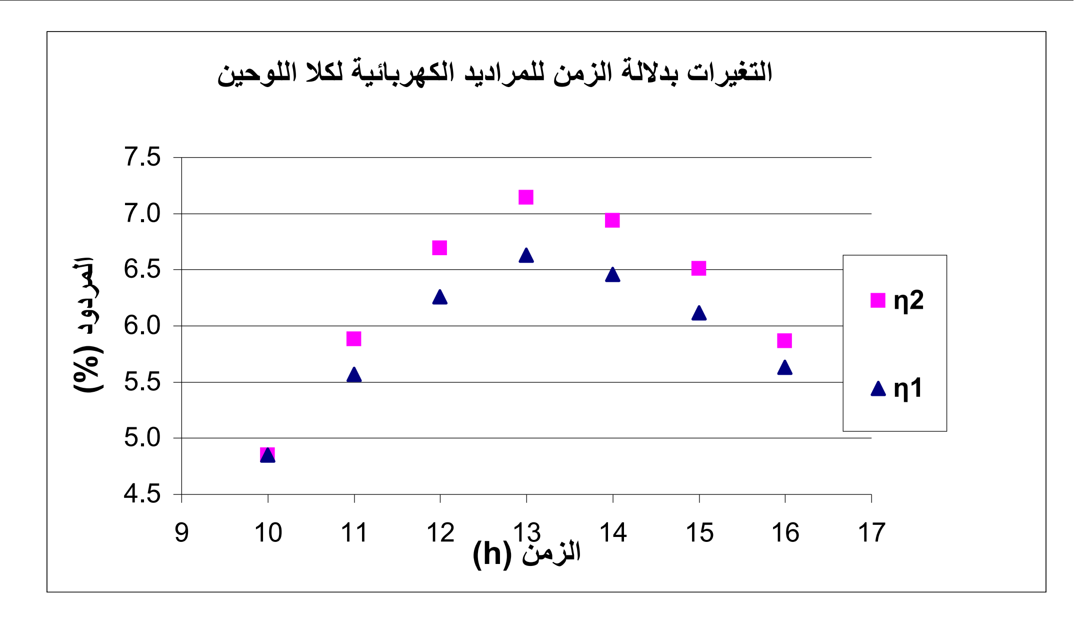




الجدول (17-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 20/06/2011

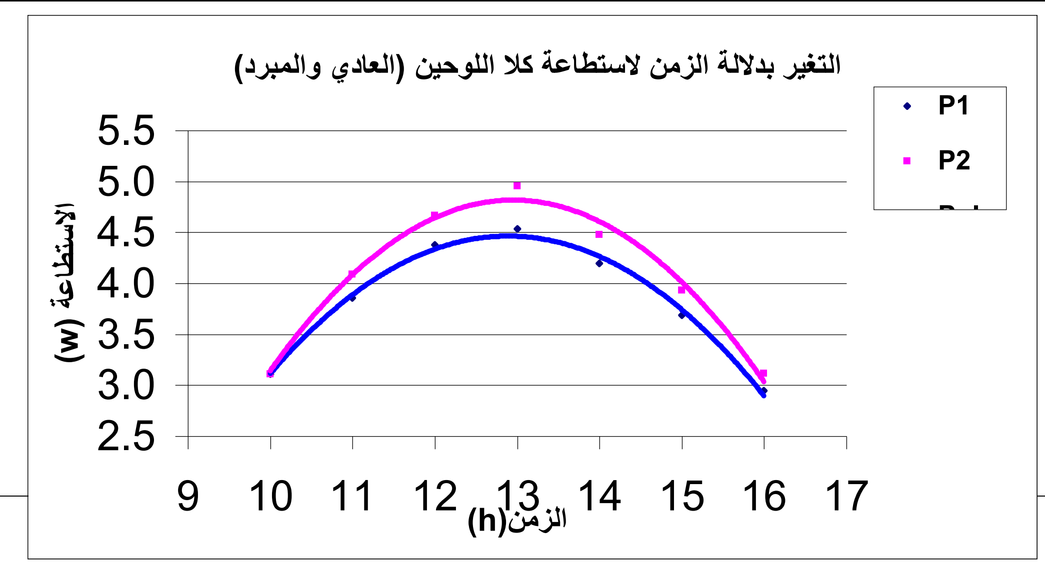
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)				ΔP	$\Delta\eta$	درجة حرارة الماء في الخزان °c	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.24	49.09	10.0	330	2.38	4.85	10.0	330	2.38	4.85			23.0	0.00	4.85	0.00
11	851.88	59.63	10.2	450	3.32	5.56	10.9	447	3.51	5.88	5.37	5.37	24.0	6.28	8.80	36.81
12	947.36	66.32	10.5	550	4.15	6.26	11.3	544	4.44	6.69	6.49	6.49	25.7	10.67	11.16	43.94
13	980.04	68.60	10.5	600	4.54	6.62	11.5	594	4.90	7.14	7.24	7.24	27.7	12.56	12.23	45.82
14	947.36	66.32	10.3	580	4.28	6.45	11.1	575	4.60	6.93	6.91	6.91	29.3	10.05	11.14	42.07
15	851.88	59.63	10.1	500	3.65	6.12	10.9	495	3.88	6.51	5.99	5.99	30.5	7.53	10.02	38.94
16	701.23	49.09	10.1	380	2.76	5.63	10.6	377	2.88	5.86	3.96	3.96	31.4	5.65	9.06	37.86
														52.74		

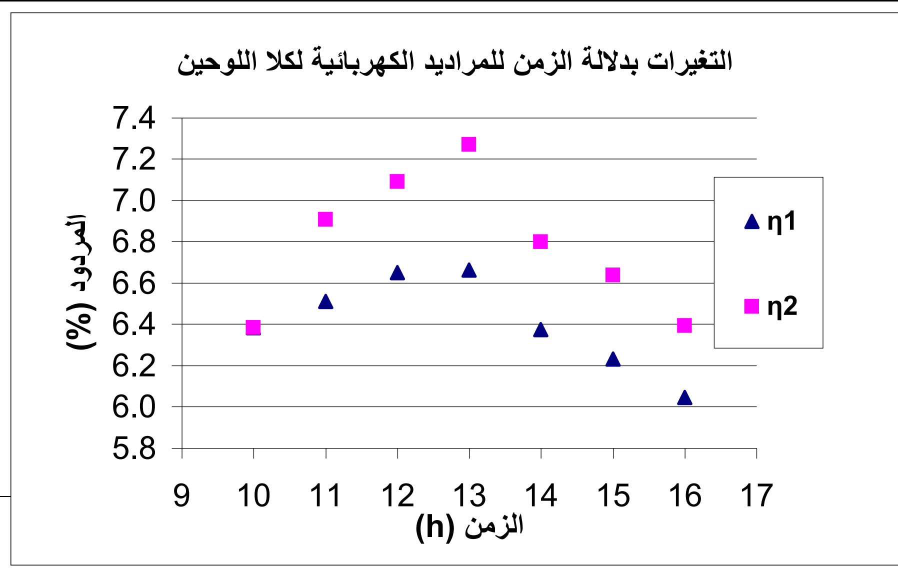




الجدول (18-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 21/06/2011

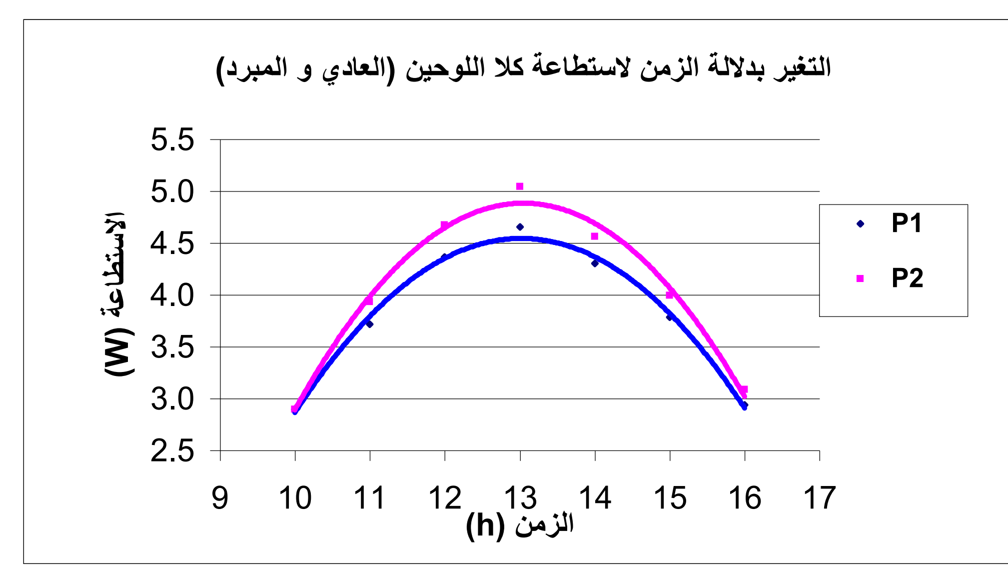
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)				ΔP	Δη	درجة حرارة الماء في الخزان	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%	°c	kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.23	49.09	10.3	420	3.11	6.33	10.3	420	3.11	6.33			23.0	0.00	6.33	0.00
11	851.88	59.63	10.3	520	3.85	6.46	11.0	516	4.09	6.86	5.77	5.77	24.4	8.79	10.95	41.00
12	947.35	66.31	10.5	580	4.38	6.60	11.3	574	4.67	7.04	6.24	6.24	26.0	10.05	11.25	41.32
13	980.03	68.60	10.5	600	4.54	6.61	11.6	593	4.95	7.22	8.43	8.43	27.9	11.93	12.05	45.13
14	947.35	66.31	10.4	560	4.19	6.32	11.2	555	4.48	6.75	6.31	6.31	29.7	11.30	11.48	44.93
15	851.88	59.63	10.2	500	3.69	6.18	11.0	496	3.93	6.59	6.16	6.16	31.2	9.42	10.98	43.67
16	701.23	49.09	10.2	400	2.94	6.00	10.9	397	3.11	6.34	5.44	5.44	32.1	5.65	9.54	37.14
														57.14		

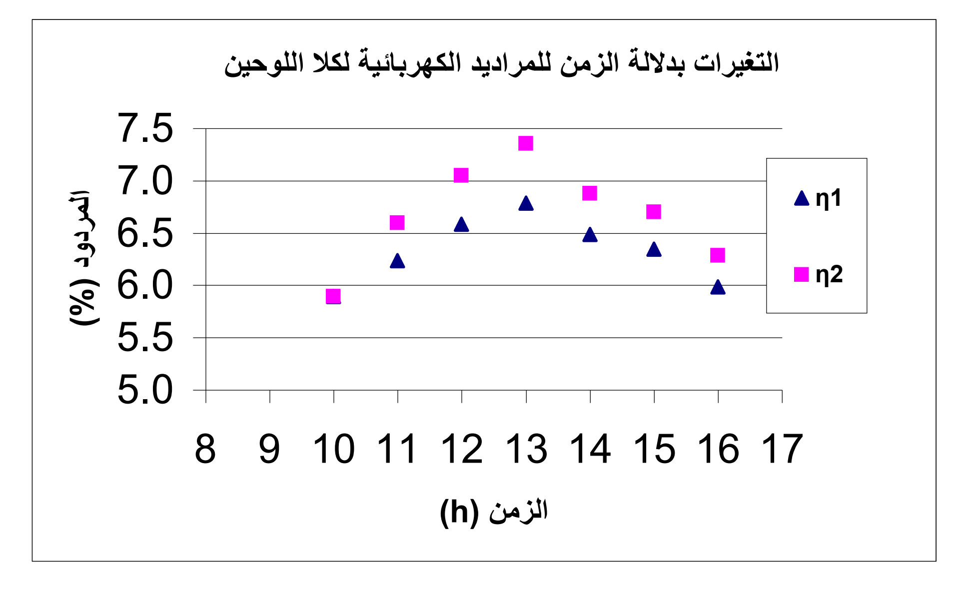




الجدول (19-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 22/06/2011

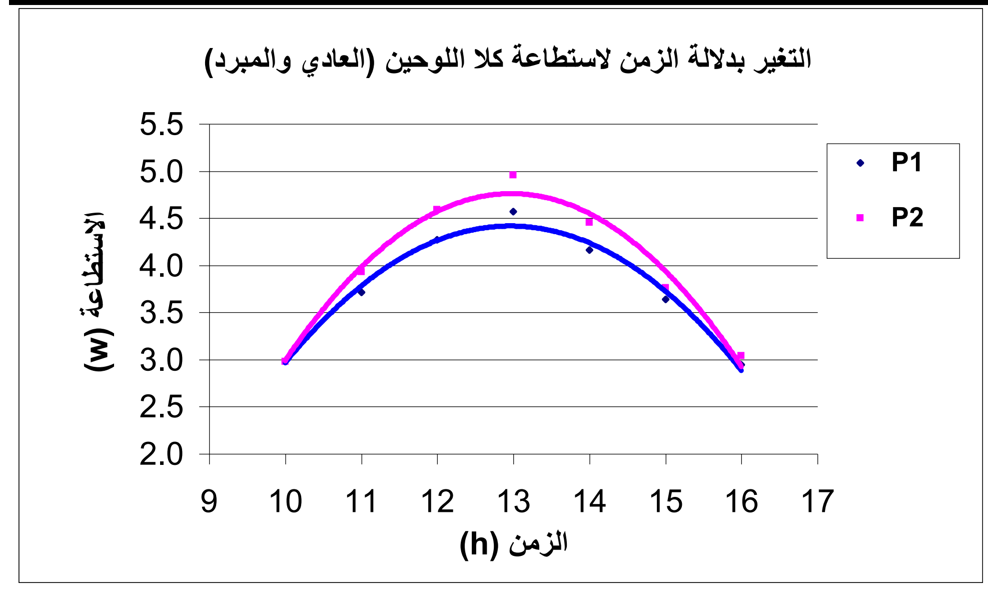
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)				ΔP	$\Delta\eta$	درجة حرارة الماء في الخزان °c	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.24	49.09	10.3	390	2.89	5.89	10.3	390	2.89	5.89			24.0	0.00	5.89	0.00
11	851.88	59.63	10.3	500	3.72	6.24	11.0	496	3.93	6.59	5.41	5.41	25.1	6.91	9.81	36.43
12	947.36	66.31	10.5	580	4.36	6.58	11.3	574	4.67	7.05	6.60	6.60	26.4	8.16	10.46	37.11
13	980.03	68.60	10.6	610	4.66	6.79	11.6	604	5.05	7.36	7.74	7.74	28.0	10.05	11.42	40.60
14	947.36	66.31	10.5	570	4.30	6.49	11.2	565	4.56	6.88	5.67	5.67	29.5	9.42	10.82	40.06
15	851.88	59.63	10.3	510	3.78	6.34	11.0	505	4.00	6.70	5.36	5.36	30.7	7.53	10.21	37.89
16	701.24	49.09	10.2	400	2.94	5.98	10.8	397	3.08	6.28	4.75	4.75	31.4	4.40	8.77	31.76
														46.46		

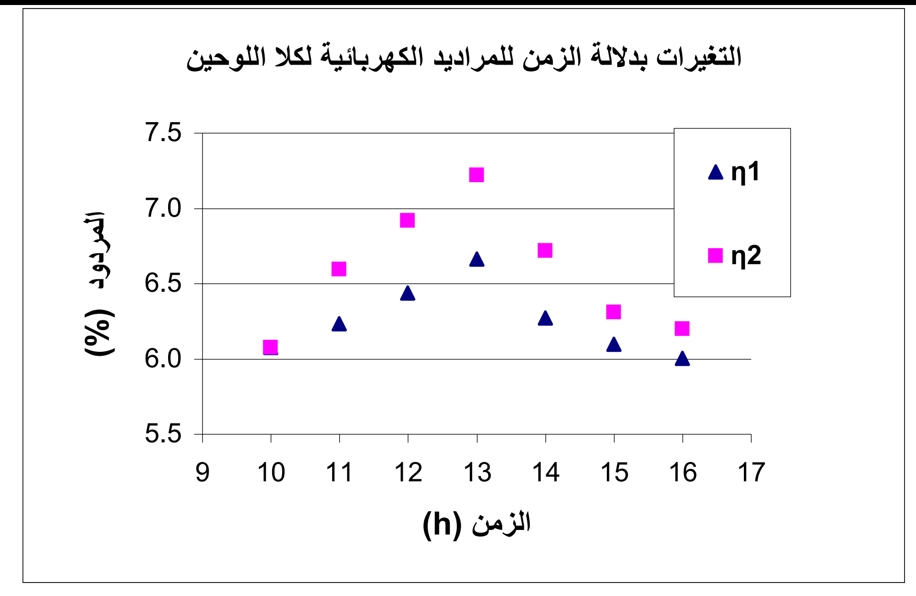




الجدول (4-20) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 23/06/2011

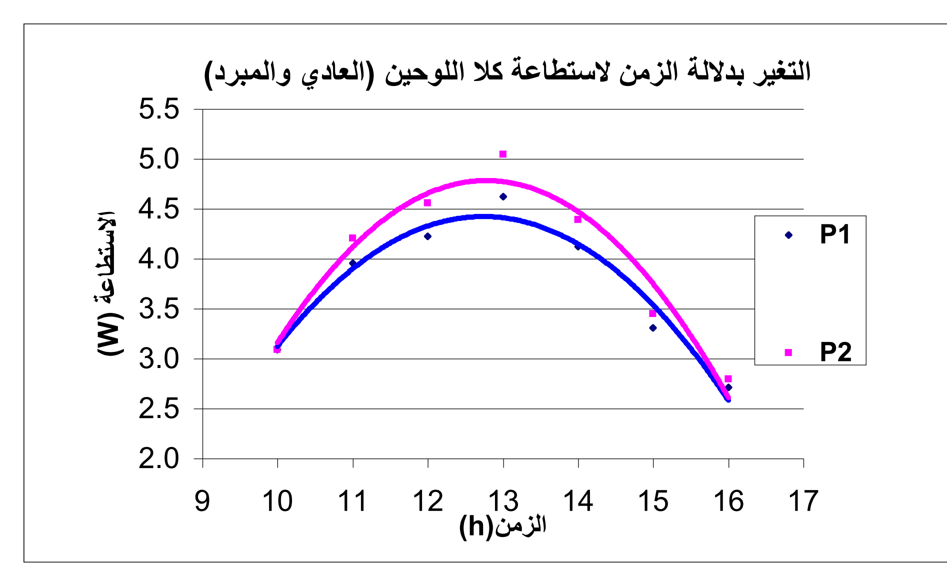
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)						درجة حرارة الماء في الخزان °c			
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2	ΔP	$\Delta\eta$		Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	701.24	49.09	10.1	410	2.98	6.07	10.1	410	2.98	6.07			25.00	0.00	6.07	0.00
11	851.89	59.63	10.3	500	3.72	6.23	11.0	496	3.93	6.59	5.50	5.50	26.30	8.16	10.40	40.07
12	947.38	66.32	10.4	570	4.27	6.44	11.3	564	4.59	6.92	6.95	6.95	28.00	10.67	11.39	43.48
13	980.05	68.60	10.6	600	4.57	6.66	11.6	593	4.95	7.22	7.73	7.73	29.90	11.93	12.05	44.72
14	947.38	66.32	10.5	550	4.16	6.27	11.3	546	4.45	6.72	6.66	6.66	31.50	10.05	10.93	42.61
15	851.89	59.63	10.4	485	3.64	6.10	11.0	475	3.76	6.31	3.36	3.36	32.80	8.16	10.11	39.71
16	701.24	49.09	10.2	400	2.95	6.00	10.7	395	3.04	6.20	3.18	3.18	33.60	5.02	9.04	33.62
														54.00		

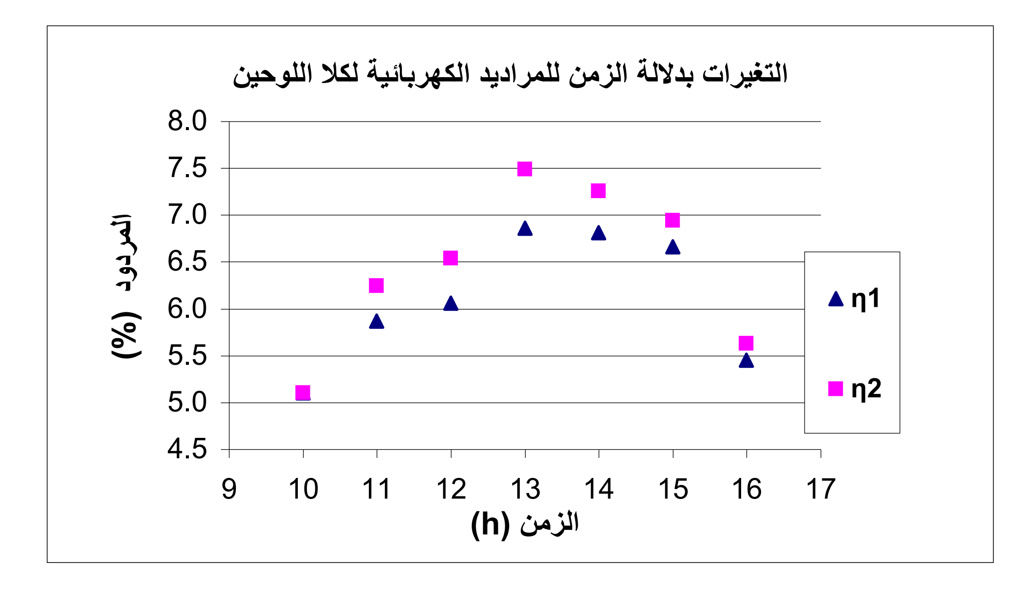




الجدول (21-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 31/06/2011

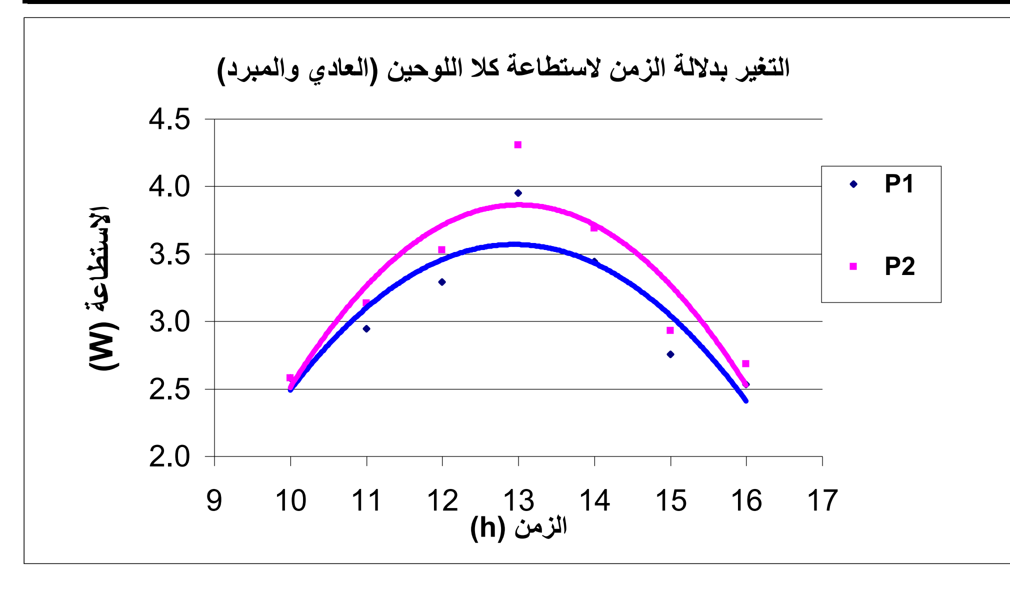
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)				ΔP	$\Delta\eta$	درجة حرارة الماء في الخزان °c	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	511.29	60.53	10.2	420	3.09	5.10	10.2	420	3.09	5.10			23.00	0.00	5.10	0.00
11	864.67	67.40	10.6	520	3.95	5.87	11.3	516	4.21	6.24	6.03	6.03	24.40	8.79	9.87	40.54
12	962.83	69.75	10.7	550	4.23	6.06	11.6	544	4.56	6.54	7.33	7.33	25.90	9.42	10.29	41.12
13	996.43	67.40	10.7	600	4.62	6.86	11.8	594	5.05	7.49	8.41	8.41	27.60	10.67	11.89	42.30
14	962.84	60.53	10.6	540	4.12	6.81	11.4	535	4.39	7.26	6.15	6.15	29.10	9.42	11.58	41.19
15	864.67	49.68	10.4	440	3.31	6.66	11.0	435	3.45	6.94	4.08	4.08	30.20	6.91	10.80	38.37
16	709.74	49.68	9.9	380	2.71	5.45	10.3	377	2.79	5.62	3.07	3.07	31.00	5.02	8.43	35.35
														50.23		

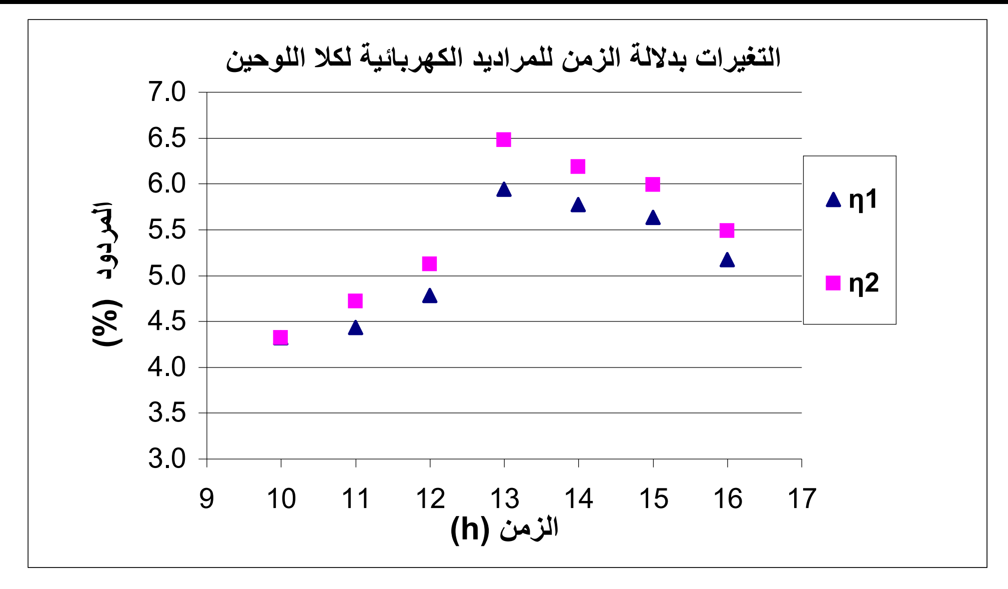




الجدول (22-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 19/06/2011

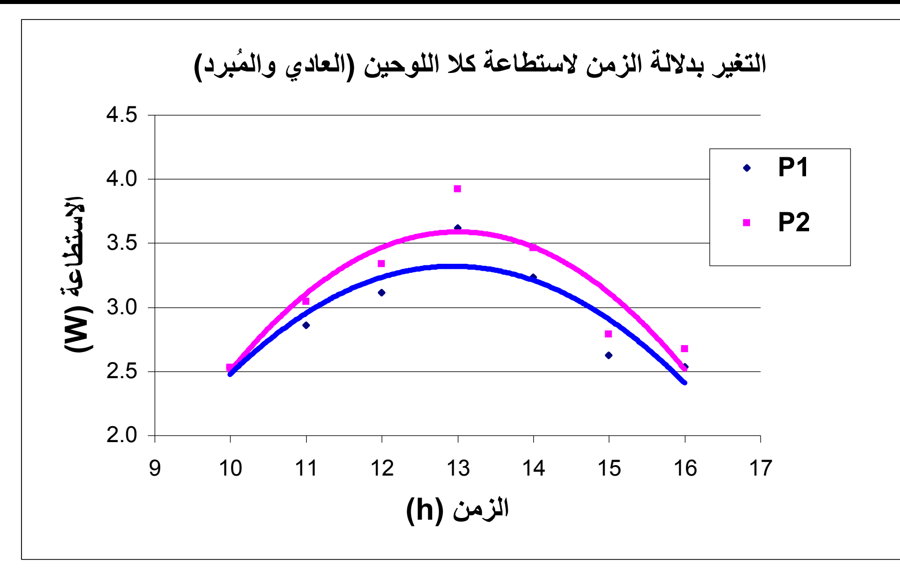
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)						درجة حرارة الماء في الخزان			
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2	ΔP	$\Delta\eta$		Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%	°c	kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	699.03	59.68	9.95	360	2.58	4.32	9.95	360	2.58	4.32			27.00	0.00	4.32	0.00
11	852.56	66.49	9.98	410	2.95	4.43	10.70	407	3.14	4.72	6.04	6.04	28.00	6.28	7.34	39.62
12	949.83	68.82	10.15	450	3.29	4.78	11.00	445	3.53	5.12	6.72	6.72	29.40	8.79	8.67	44.89
13	983.11	66.49	10.55	520	3.95	5.94	11.61	515	4.31	6.48	8.27	8.27	31.10	10.67	10.94	45.67
14	949.83	59.68	10.40	460	3.44	5.77	11.23	456	3.69	6.18	6.66	6.66	32.50	8.79	10.28	43.83
15	852.56	48.93	10.07	380	2.76	5.63	10.83	376	2.93	5.99	5.99	5.99	33.50	6.28	9.55	41.06
16	699.03	48.93	10.04	350	2.53	5.17	10.74	347	2.68	5.49	5.75	5.75	34.40	5.65	8.69	40.53
														46.46		

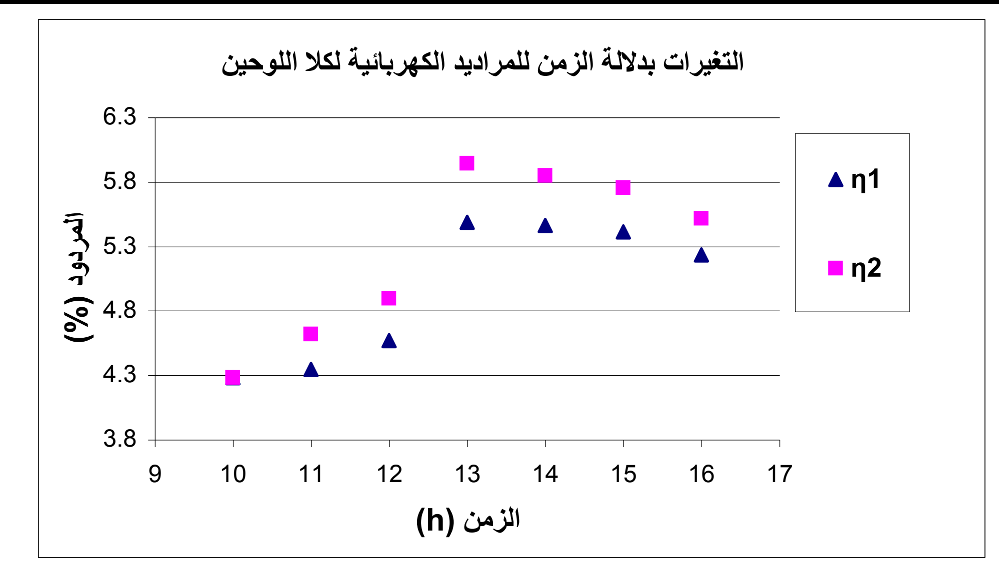




الجدول (4-23) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 21/07/2011

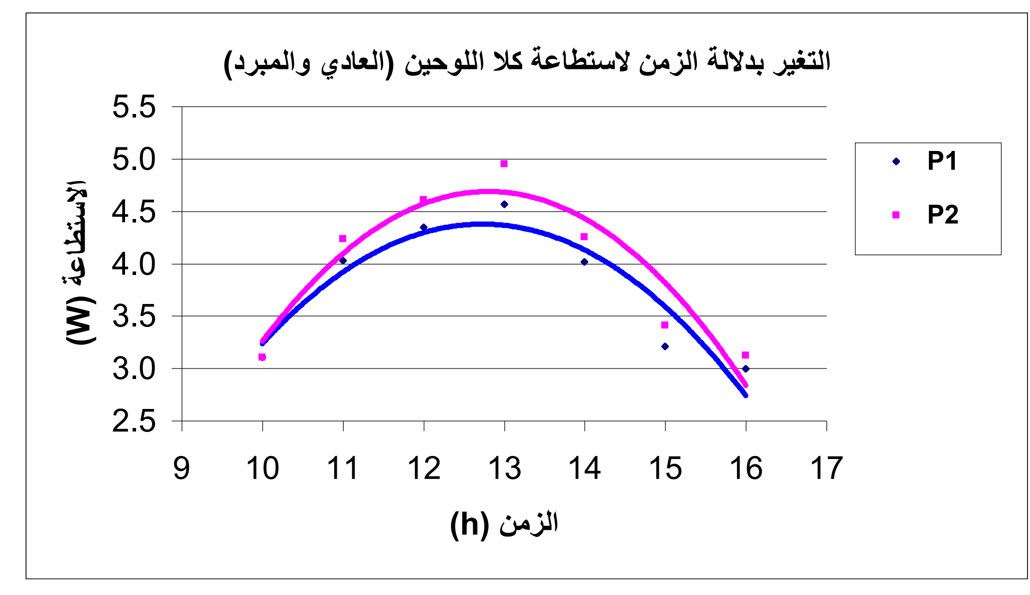
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مًبرد مائياً)				ΔP	$\Delta\eta$	درجة حرارة الماء في الخزان °c	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	698.87	59.70	9.75	360	2.53	4.23	9.75	360	2.53	4.23			28.00	0.00	4.23	0.00
11	852.87	66.53	9.92	400	2.86	4.29	10.63	397	3.04	4.57	6.04	6.04	29.10	6.91	7.45	42.39
12	950.43	68.87	10.05	430	3.11	4.52	10.90	425	3.34	4.85	6.79	6.79	30.60	9.42	8.65	47.75
13	983.81	66.53	10.25	490	3.62	5.44	11.20	486	3.92	5.89	7.74	7.74	32.40	11.30	10.61	48.77
14	950.43	59.70	10.20	440	3.23	5.41	11.02	436	3.46	5.80	6.66	6.66	33.90	9.42	10.18	46.84
15	852.87	48.92	10.12	360	2.62	5.36	10.88	356	2.79	5.70	5.99	5.99	35.00	6.91	9.63	44.29
16.00	698.87	48.92	10.06	350	2.54	5.18	10.76	345	2.67	5.47	5.19	5.19	36.00	6.28	9.03	42.62
														50.23		

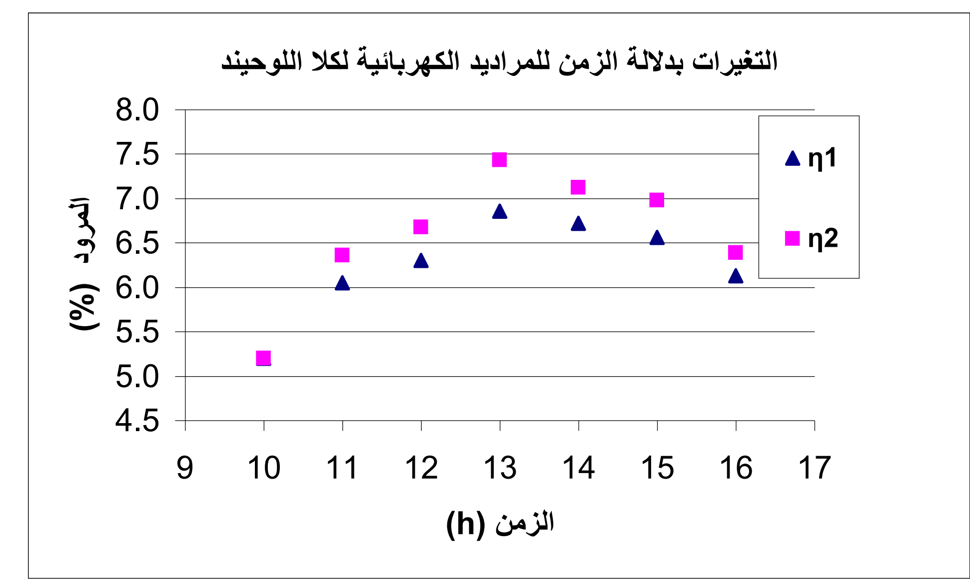




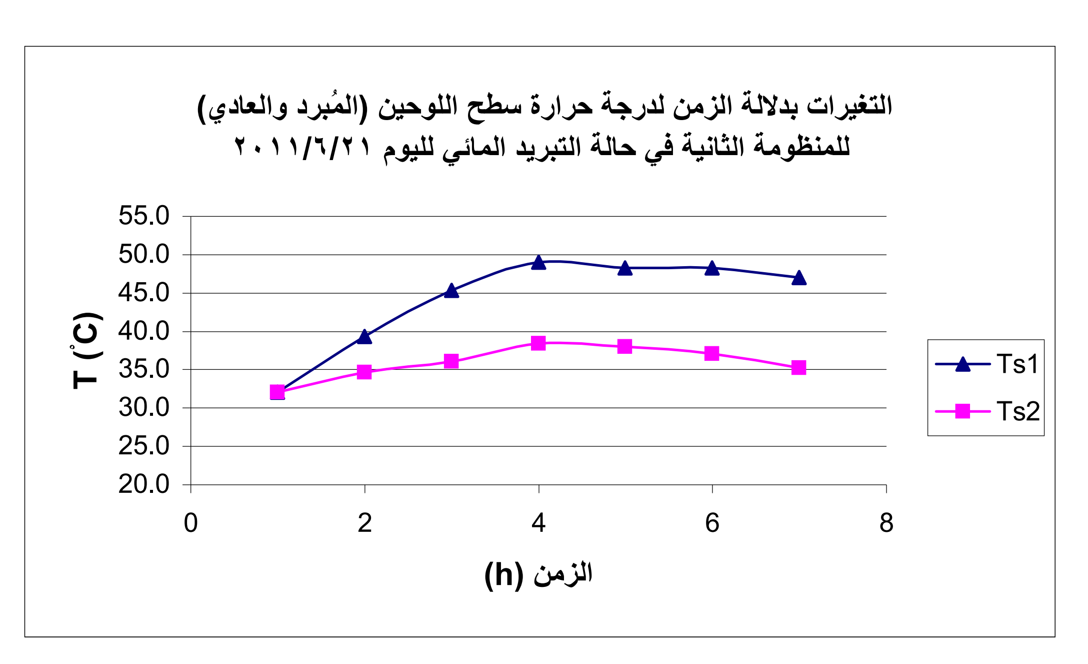
الجدول (24-4) نتائج التبريد المائي على المنظومة الثانية لليوم 26/07/2011

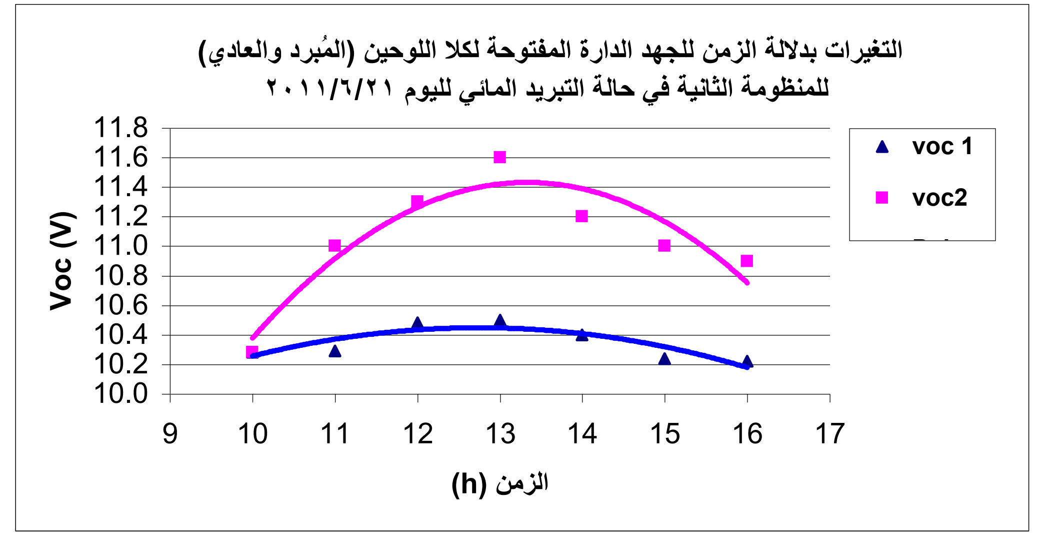
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 (عادي)				اللوح 2 (مُبرد مائياً)						درجة حرارة الماء في الخزان			
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2	ΔP	$\Delta\eta$		Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%	°c	kJ	%	%
														m.cp.Δt		
10	698.24	59.74	9.8	440	3.10	5.20	9.8	440	3.10	5.20			26.00	0.00	5.20	0.00
11	853.49	66.63	9.8	570	4.03	6.05	10.4	566	4.24	6.36	4.88	4.88	27.20	7.53	9.50	36.33
12	951.83	68.98	9.9	610	4.35	6.30	10.6	603	4.61	6.68	5.58	5.58	28.70	9.42	10.47	39.79
13	985.47	66.63	10.2	620	4.57	6.85	11.2	614	4.95	7.43	7.77	7.77	30.45	10.99	12.01	42.94
14	951.83	59.74	10.1	550	4.02	6.72	10.8	547	4.25	7.12	5.60	5.60	31.90	9.10	11.35	40.80
15	853.49	48.88	9.9	450	3.21	6.56	10.6	445	3.41	6.98	5.93	5.93	33.10	7.53	11.26	41.71
16	698.24	48.88	9.9	420	2.99	6.13	10.4	417	3.12	6.39	4.12	4.12	34.00	5.65	9.60	36.20
														50.23		





الجـــدول (4 -25)		
التغيرات بدلالة الزمن لدرجة حرارةسطح اللوحين (المُبرد والعادي)للمنظومة الثانية في حالة التبريد المائي		
لليوم: 21/06/2011		
الساعة	T_{s1}	T_{s2}
10	32.0	32.0
11	39.3	34.6
12	45.3	36.0
13	49.0	38.4
14	48.2	38.0
15	48.2	37.0
16	47.0	35.2

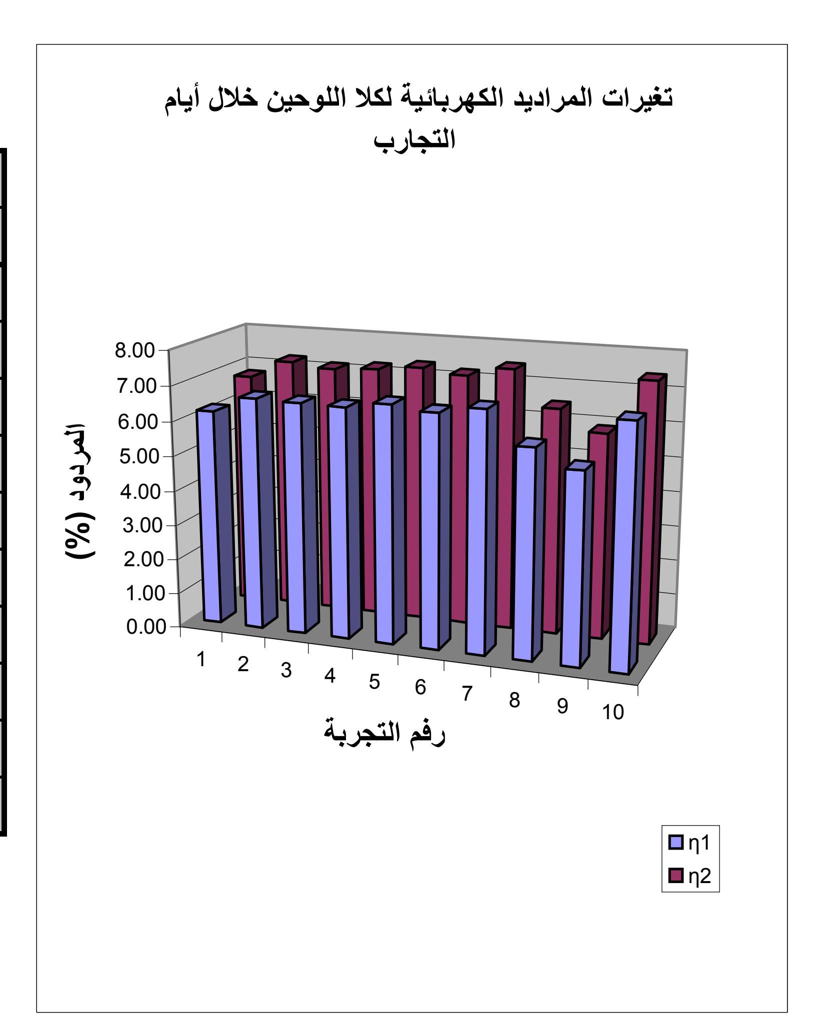




الجدول (4-26)

نتائج الحسابات المختلفة عند استخدام التبريد المائي على المنظومة الثانية خلال أيام التجارب المختلفة

رقم التجربة	اليوم	η_1 %	η_2 %	ΔP %	$\Delta\eta$ %	Q_t kJ	η_{tot} %	$\Delta\eta_{tot}$ %
1	18/06/2011	6.20	6.75	8.13	8.13	33.91	9.60	35.39
2	19/06/2011	6.66	7.26	8.29	8.29	47.72	11.33	41.21
3	20/06/2011	6.62	7.14	7.24	7.24	52.74	12.23	45.82
4	21/06/2011	6.61	7.22	8.43	8.43	57.14	12.05	45.13
5	22/06/2011	6.79	7.36	7.74	7.74	46.46	11.42	40.60
6	23/06/2011	6.66	7.22	7.73	7.73	54.00	12.05	44.72
7	31/05/2011	6.86	7.49	8.41	8.41	50.23	11.89	42.30
8	19/07/2011	5.94	6.48	8.27	8.27	46.46	10.94	45.67
9	21/07/2011	5.44	5.89	7.74	7.74	50.23	10.61	48.77
10	26/07/2011	6.85	7.43	7.77	7.77	50.23	12.01	42.94



2-6-2-2: تجارب التبريد الهوائي للمنظومة الثانية:

شمل هذا الأنموذج من التجارب استخدام التبريد الهوائي لسطح اللوح المُراد تبريده، أما اللوح الآخر في المنظومة فلم يتم تبريده، وذلك لمقارنة مقدار التحسين في المردود.

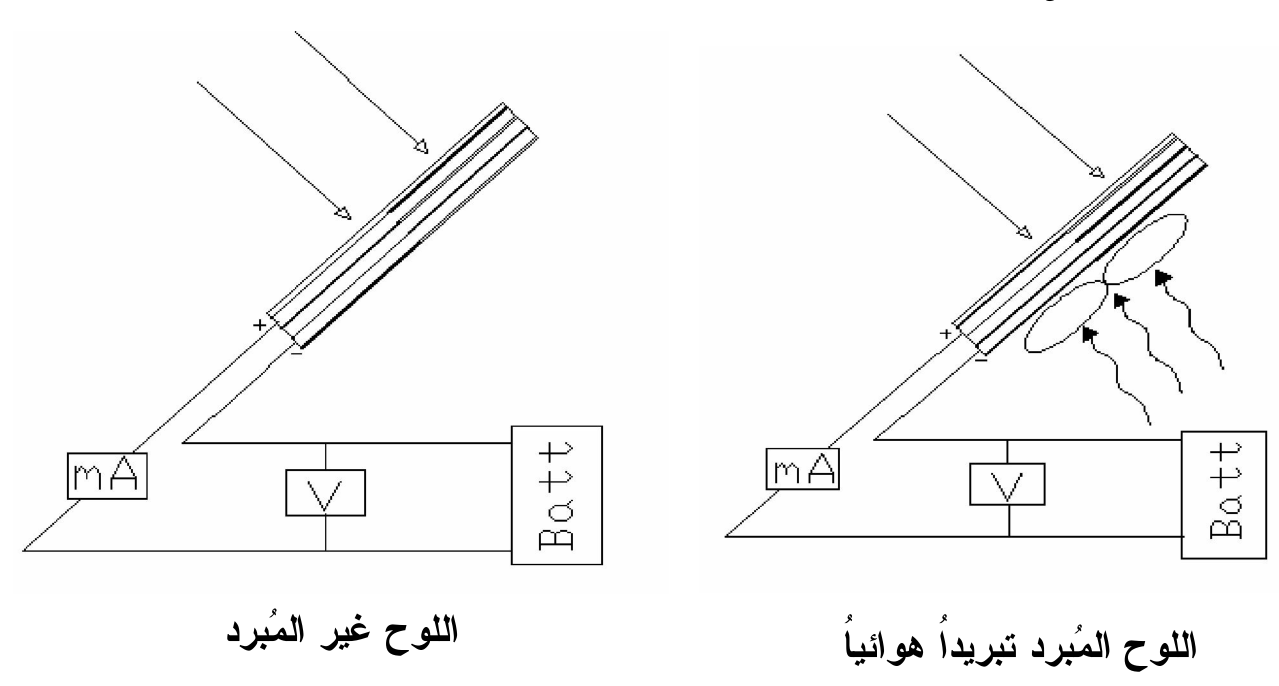
- **مبدأ العمل** :يعتمد مبدأ التبريد الهوائي في هذه الحالة على وجود مروحة تحت اللوح الفوتوفولتي مباشرة، كما في الشكل (4-8)، تقوم بدفع الهواء باتجاه السطح الأسفل لـــ اللوح مساهمة بخفض درجة حرارته ومن ثمّ زيادة استطاعته.

تساهم المنظومات الفوتوفولتية الكبيرة، التي يُستخدم فيها هذا النوع من التبريد، بالاستفادة من الهواء المدفوع بواسطة المراوح باتجاه الألواح الفوتوفولتيه لهذه المنظومات. يتم ذلك خلال سحب الهواء بعد أن يسخن– بفعل سحب حرارة الألواح– وتوجيهه للاستفادة منه في تدفئة الأمكنة. لكن، في نطاق تجاربنا، لم يتم الاستفادة من الهواء الساخن وإنما تم التركيز على تحسين مردود اللوح الفوتوفولتي بتبريد سطحه باستخدام تيار مستمر من الهواء المدفوع بوساطة المروحة.



الشكل (4–8) اللوح المُبرد تبريداً هوائياً في المنظومة الثانية

○ **مخطط العمل :**



اللوح غير المُبرد **اللوح المُبرد تبريداً هوائياً**

الشكل (4–9) مخطط العمل للمنظومة الثانية في حالة التبريد الهوائي

○ **منهجية أخذ القياسات على المنظومات الفوتوفولتية المُختبرة:**

قمنا بإجراء التجارب على المنظومة الثانية في حالة التبريد الهوائي بمعدّل 6 ساعات لكل يوم بدءاً من الساعة العاشرة صباحاً حتى الساعة الرابعة بعد الظهر. وقمنا بأخذ القياسات الساعيّة الآتية في كل تجربة وهي: قياسات جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار دارة القصر لــ اللوح الفوتوفولتي (I_{sc})، حيث تقرر أخذ هذه القياسات على رأس كل ساعة. أما شدة الإشعاع الشمسي تم حسابها في كل ساعة اعتماداً على طريقة (ASHRAE).

وبعدها قمنا بحساب الاستطاعة الكهربائية العظمى لــ الألواح الكهربائية (P_{MPP}) المتمثلة بالعلاقة (4–7)، و المراديد الكهربائية (η_e) الممثلة بالعلاقة (4–8)، والزيادة النسبية في المردود الكهربائي لــ اللوح ($\Delta\eta_e$) المعطاة بالعلاقة (4–9).

$$P_{MPP} = FF \times Isc \cdot Voc \qquad (7-4)$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A_c \cdot H_t} \qquad (8-4)$$

$$\Delta\eta = (\eta_2 - \eta_1) \times 100 / \eta_2 \qquad (9-4)$$

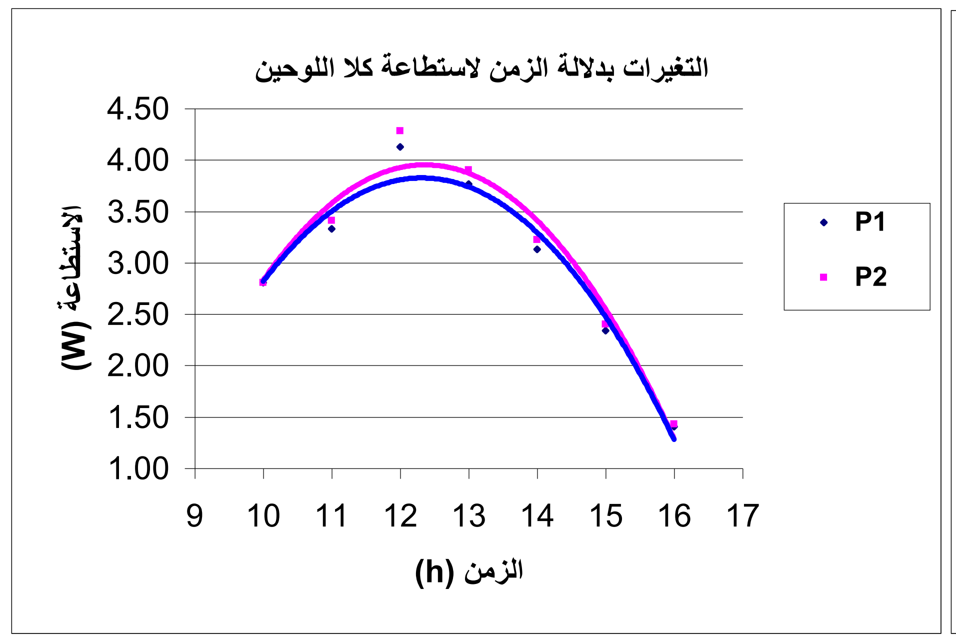
- **نتائج القياسات والحسابات :**

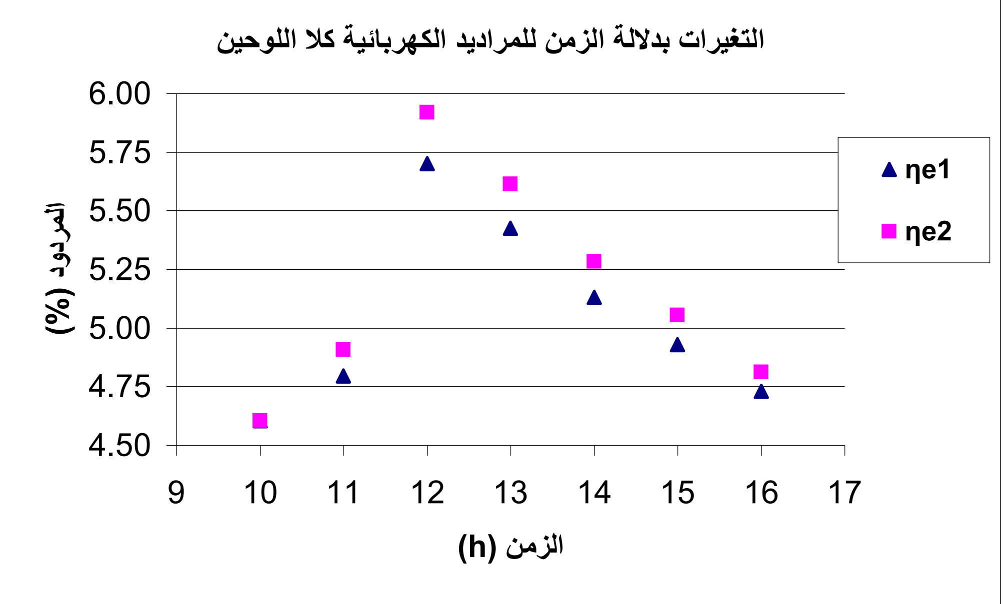
يمكن إجمال القيم الساعيّة المُقاسة والمُحسوبة للتجارب المُنجزة على المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي وخلال أيام مختلفة من خلال جداول تُعبر عن :

شدة الإشعاع الشمسي(H_t)، ولكل لوح: جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})، وتيار دارة القصر (I_{sc})، والإستطاعة(P)، والمردود الكهربائي(η)– الرقم 1 يخص اللوح غير المُبرد ، والرقم 2 يخص اللوح المُبرد– والتغيرات النسبية في كل من الاستطاعة (ΔP)، والمردود الكهربائي ($\Delta\eta$).

الجـدول (27-4) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 07/10/2010

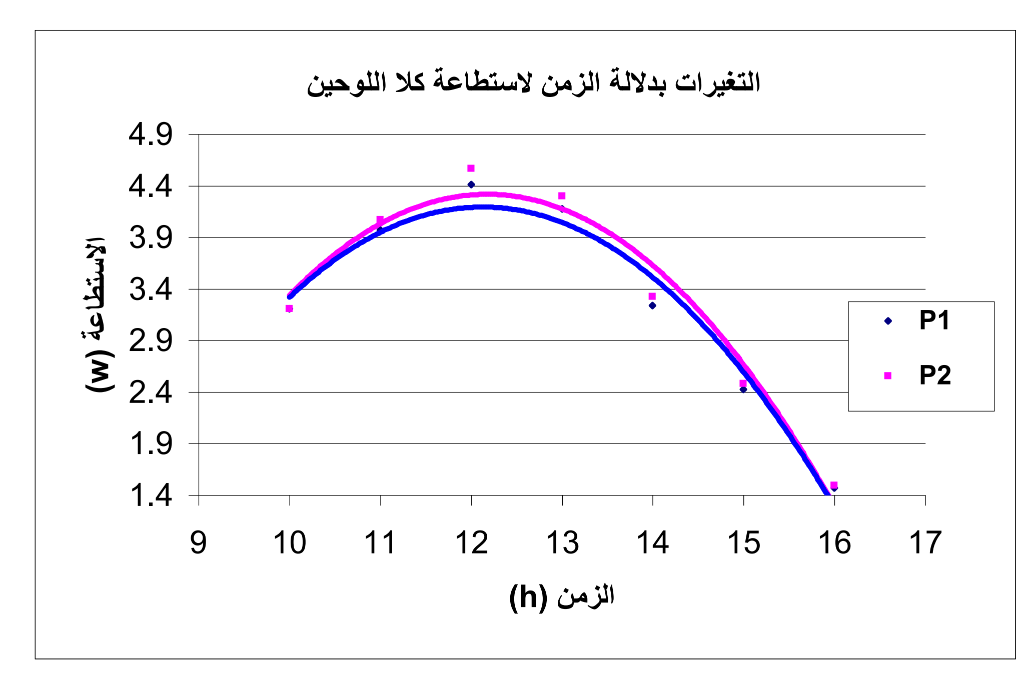
الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)				ΔP	$\Delta \eta e$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}		
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	871.30	60.99	10.4	375	2.81	4.60	10.4	375	2.81	4.60	0.00	0.00
11	992.46	69.47	10.8	430	3.33	4.80	11.1	428	3.41	4.91	2.24	2.24
12	1033.75	72.36	10.8	530	4.13	5.70	11.3	527	4.28	5.92	3.68	3.68
13	992.46	69.47	10.7	490	3.77	5.42	11.1	488	3.90	5.61	3.37	3.37
14	871.30	60.99	10.6	410	3.13	5.13	11.0	408	3.22	5.28	2.88	2.88
15	678.03	47.46	10.2	320	2.34	4.93	10.4	319	2.40	5.05	2.50	2.50
16	424.68	29.73	9.3	210	1.41	4.73	9.5	209	1.43	4.81	1.66	1.66

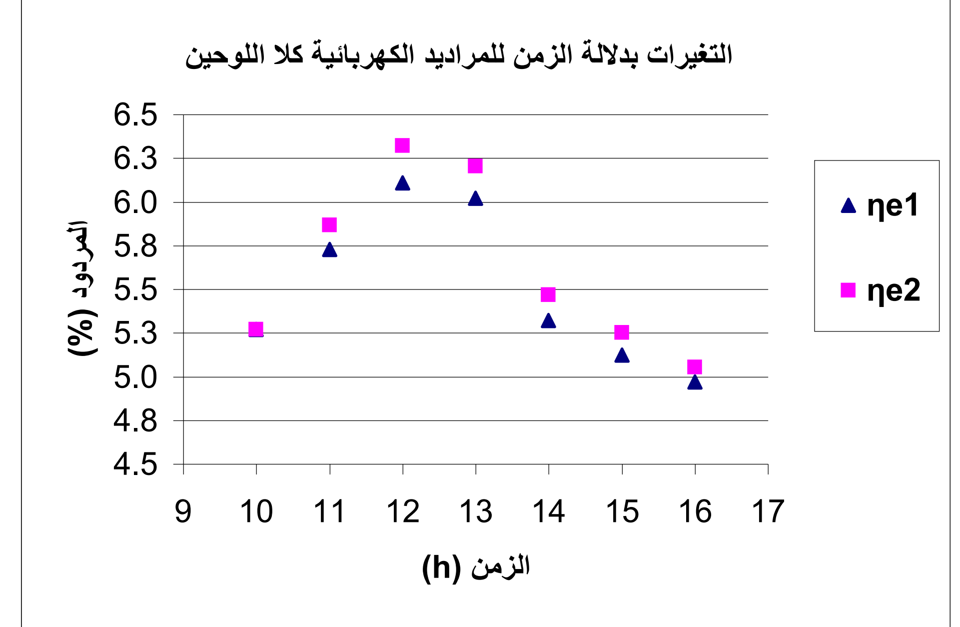




الجـدول (28-4) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليــــوم: 08/10/2010

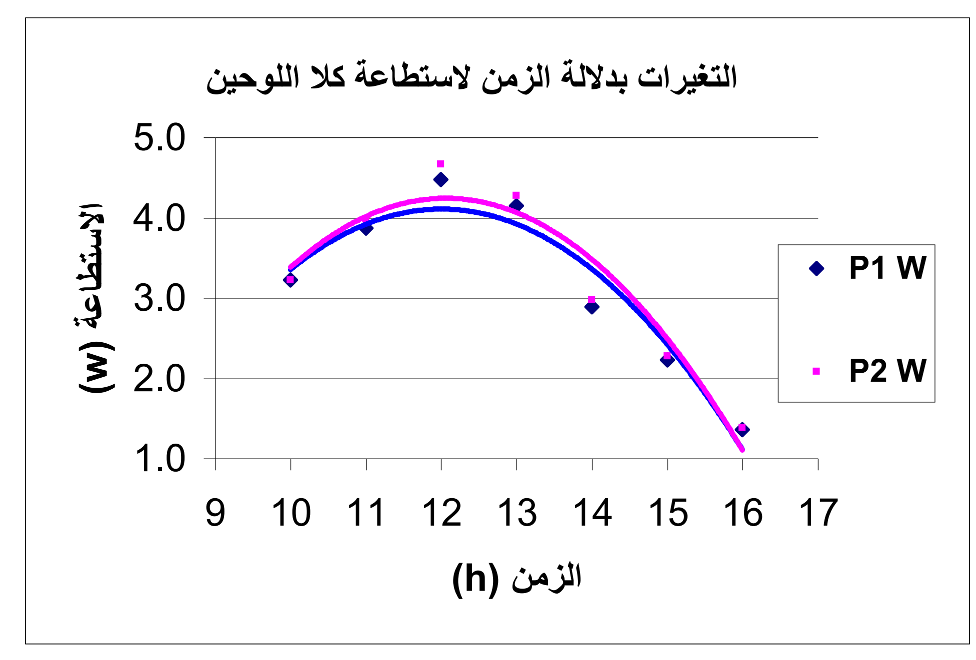
الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)				ΔP	Δηe
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}		
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	869.03	60.83	10.4	430	3.20	5.27	10.4	430	3.20	5.27	0.00	0.00
11	990.24	69.32	10.6	520	3.97	5.73	10.9	518	4.07	5.87	2.38	2.38
12	1031.54	72.21	10.8	570	4.41	6.11	11.2	567	4.56	6.32	3.30	3.30
13	990.24	69.32	10.7	540	4.17	6.02	11.1	537	4.30	6.20	3.00	3.00
14	869.03	60.83	10.7	420	3.24	5.32	11.0	418	3.33	5.47	2.69	2.69
15	675.62	47.29	10.2	330	2.42	5.12	10.5	329	2.48	5.25	2.38	2.38
16	421.81	29.53	9.7	210	1.47	4.97	9.9	209	1.49	5.05	1.69	1.69

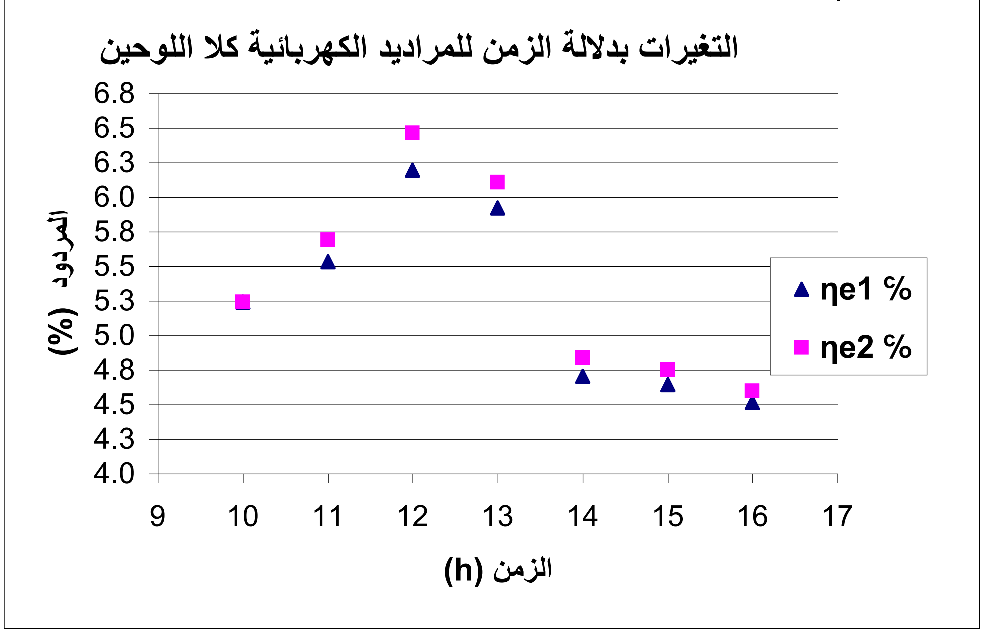




الجـدول (29-4) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليـــوم: 10/10/2010

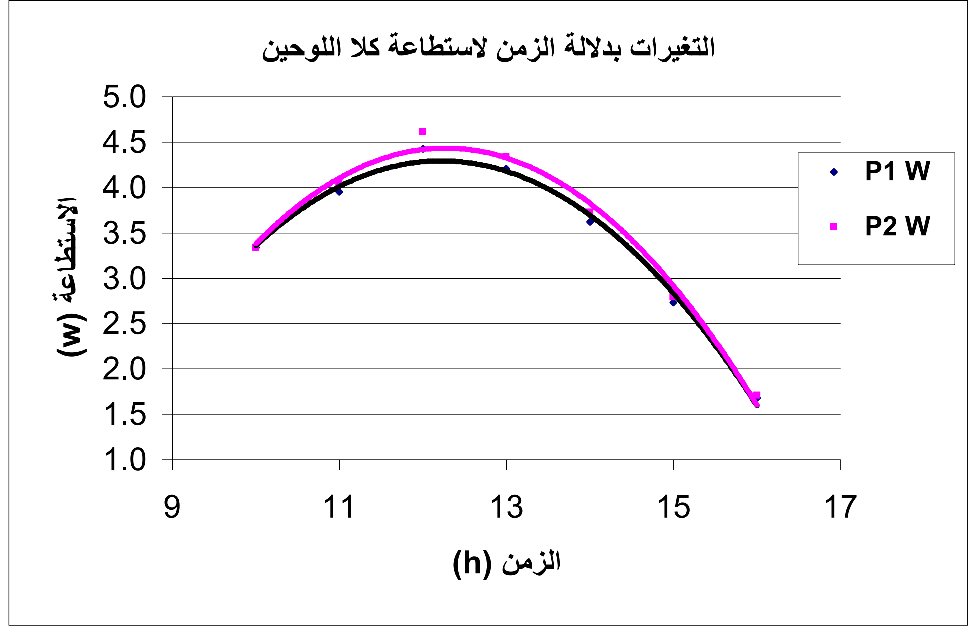
الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)					
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}	ΔP	$\Delta\eta e$
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	878.55	61.50	10.2	440	3.22	5.24	10.2	440	3.22	5.24	0.00	0.00
11	999.68	69.98	10.8	500	3.87	5.53	11.1	499	3.98	5.69	2.77	2.77
12	1031.54	72.21	10.9	570	4.47	6.20	11.4	567	4.67	6.46	4.16	4.16
13	999.68	69.98	10.7	540	4.14	5.92	11.0	537	4.27	6.11	3.00	3.00
14	878.55	61.50	10.3	390	2.89	4.70	10.6	389	2.98	4.84	2.80	2.80
15	684.90	47.94	10.0	310	2.23	4.64	10.2	309	2.28	4.75	2.31	2.31
16	429.60	30.07	9.2	205	1.36	4.52	9.4	204	1.38	4.60	1.76	1.76

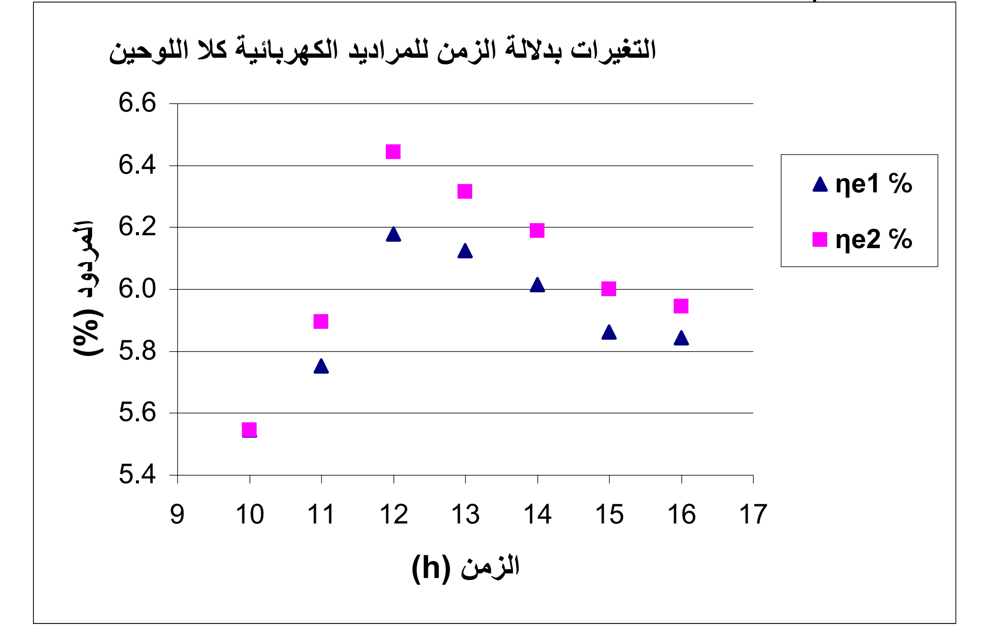




الجـدول (4-30) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 12/10/2010

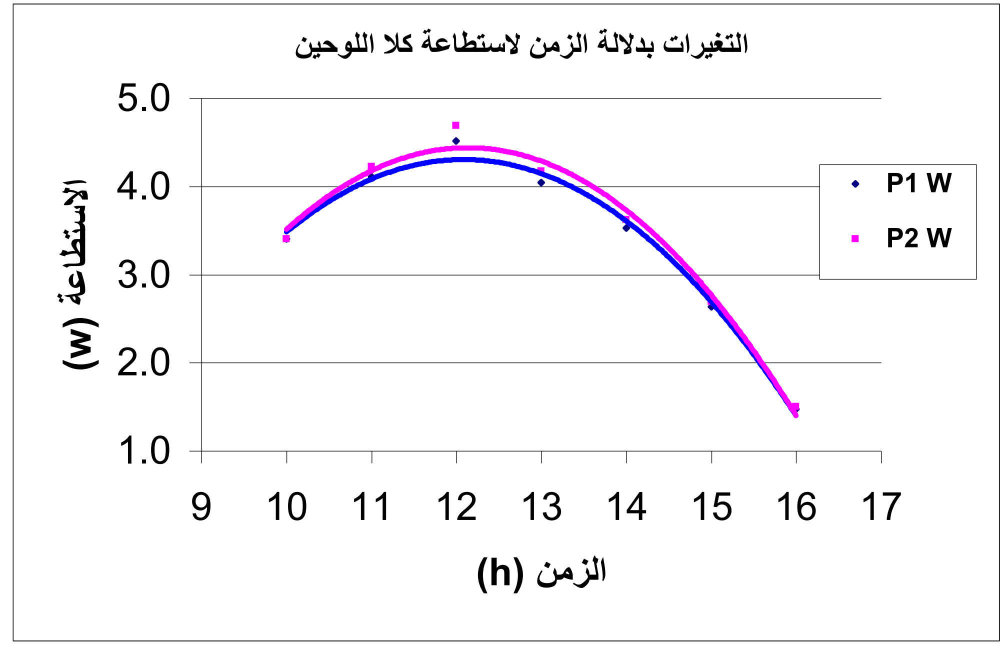
الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)				ΔP	Δηe
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}		
	W/m^2	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	859.49	60.16	10.5	440	3.34	5.54	10.5	440	3.34	5.54	0.00	0.00
11	980.85	68.66	10.7	515	3.95	5.75	10.9	513	4.05	5.89	2.43	2.43
12	1022.17	71.55	10.8	570	4.42	6.18	11.3	567	4.61	6.44	4.12	4.12
13	980.85	68.66	10.6	550	4.21	6.13	11.0	547	4.34	6.31	3.00	3.00
14	859.49	60.16	10.5	480	3.62	6.01	10.8	479	3.72	6.19	2.81	2.81
15	665.50	46.59	10.3	370	2.73	5.86	10.5	368	2.80	6.00	2.31	2.31
16	409.79	28.69	9.7	240	1.68	5.84	9.9	239	1.70	5.94	1.69	1.69

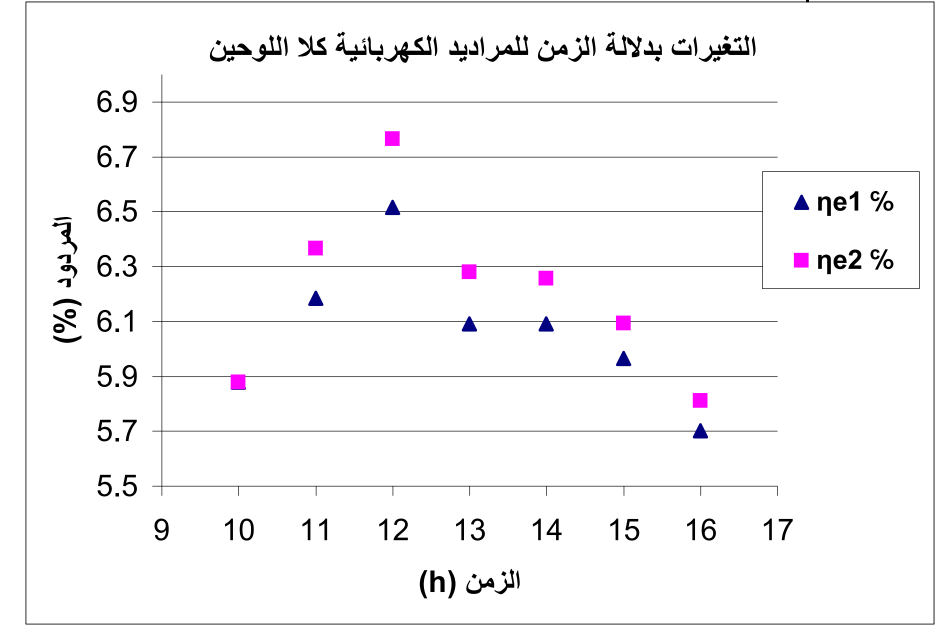




الجـدول (4-30) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 24/10/2010

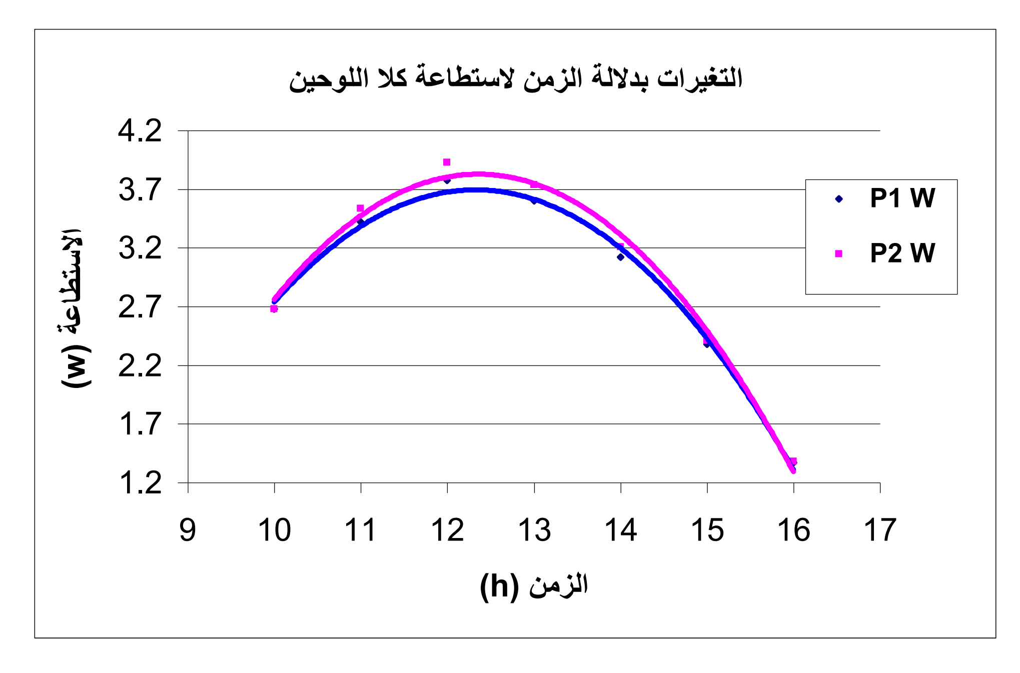
الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)				ΔP	Δηe
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}		
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	827.03	57.89	10.7	440	3.40	5.88	10.7	440	3.40	5.88	0.00	0.00
11	948.65	66.41	10.6	540	4.11	6.18	10.9	538	4.23	6.37	2.86	2.86
12	989.96	69.30	10.8	580	4.51	6.51	11.3	577	4.69	6.76	3.69	3.69
13	948.65	66.41	10.6	530	4.04	6.09	11.0	527	4.17	6.28	3.01	3.01
14	827.03	57.89	10.4	470	3.53	6.09	10.7	469	3.62	6.26	2.63	2.63
15	631.39	44.20	10.2	360	2.64	5.96	10.4	359	2.69	6.09	2.12	2.12
16	369.12	25.84	9.3	220	1.47	5.70	9.5	219	1.50	5.81	1.88	1.88

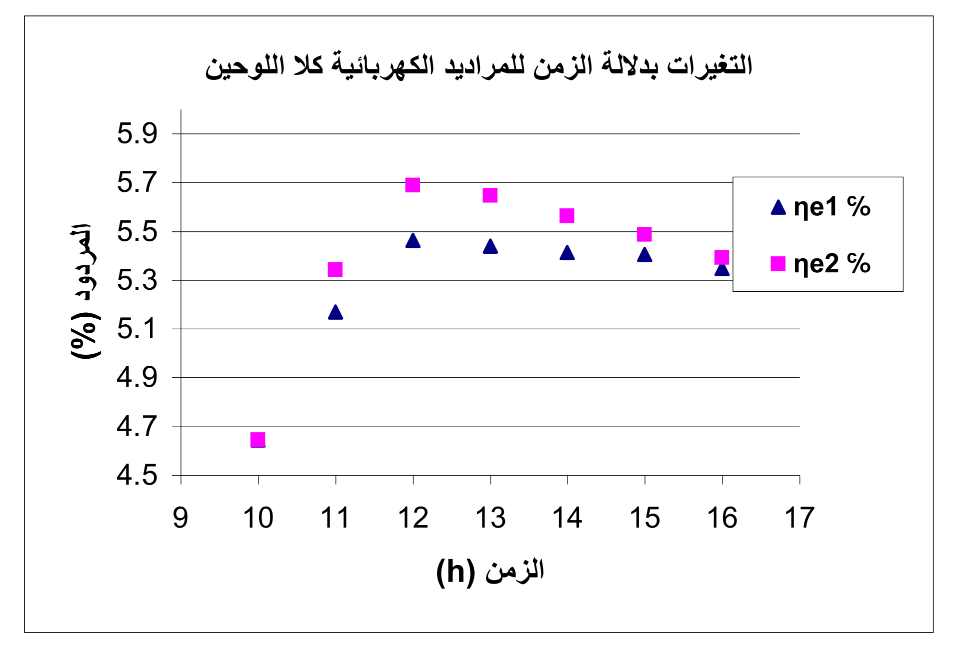


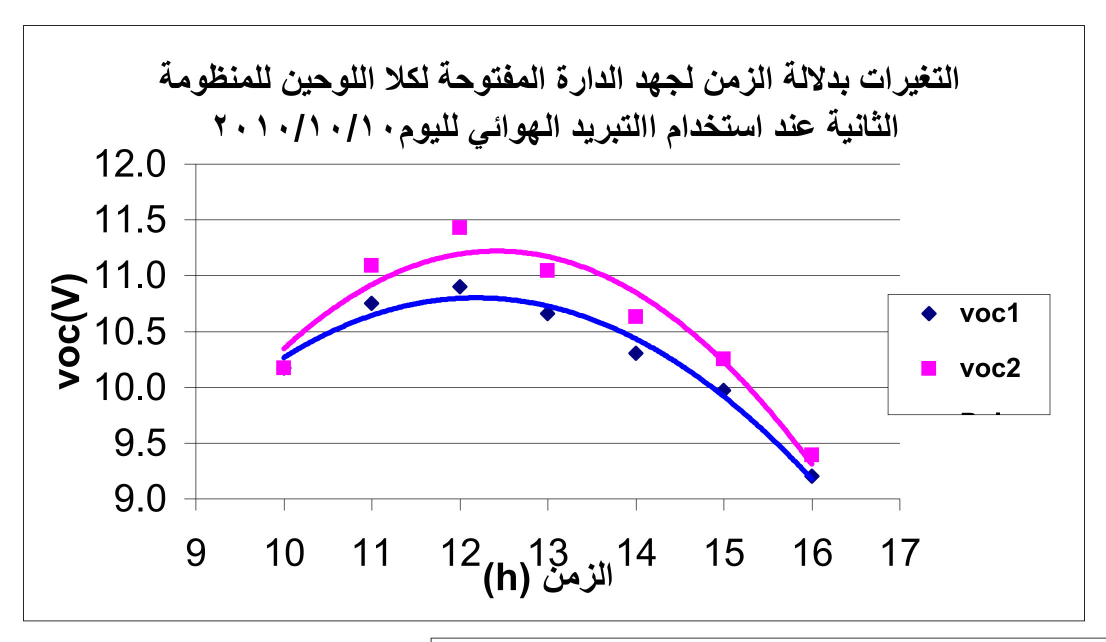


الجـدول (30-4) نتائج التبريد الهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 25/10/2010

الساعة	شدة الإشعاع الشمسي		اللوح 1				اللوح 2 (مبرد هوائياً)				ΔP	$\Delta \eta e$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_{e1}	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_{e2}		
	W/m^2	W	V	mA	W	%	V	m A	W	%	%	%
10	824.13	57.69	10.6	350	2.68	4.64	10.6	350	2.68	4.64	0.00	0.00
11	945.77	66.20	10.8	440	3.42	5.17	11.2	438	3.54	5.34	3.25	3.25
12	987.07	69.10	10.9	480	3.77	5.46	11.4	477	3.93	5.69	3.95	3.95
13	945.77	66.20	10.9	460	3.60	5.44	11.3	457	3.74	5.65	3.68	3.68
14	824.13	57.69	10.8	400	3.12	5.41	11.2	398	3.21	5.56	2.71	2.71
15	628.35	43.98	10.3	320	2.38	5.41	10.5	318	2.41	5.49	1.48	1.48
16	365.47	25.58	9.5	200	1.37	5.35	9.6	199	1.38	5.39	0.84	0.84

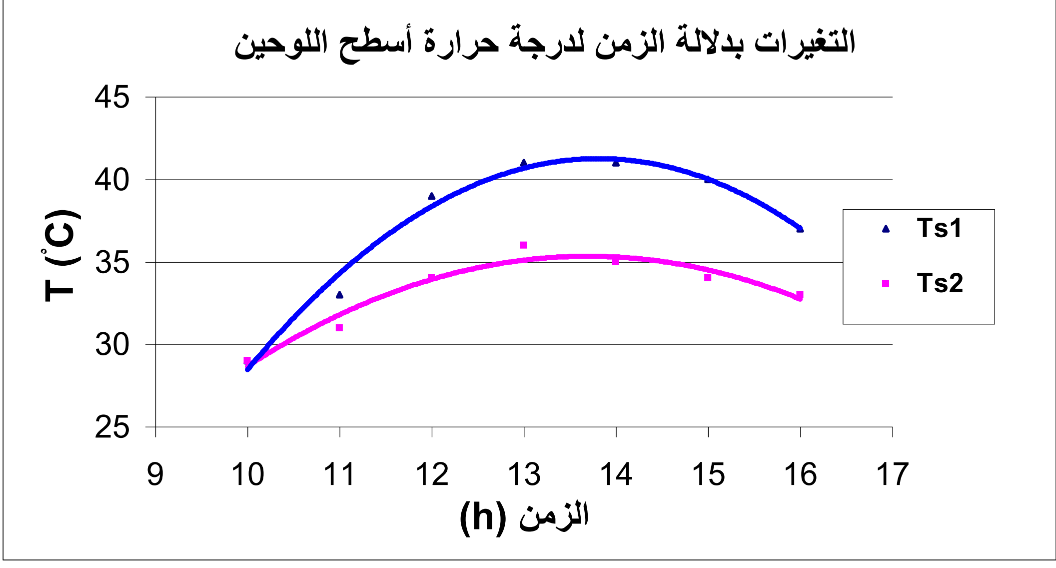






الجــدول (4-33)
التغيرات لدرجات حرارة اللوحين (المُبرد والعادي)
للمنظومة عند استخدام التبريد الهوائي لليــوم:

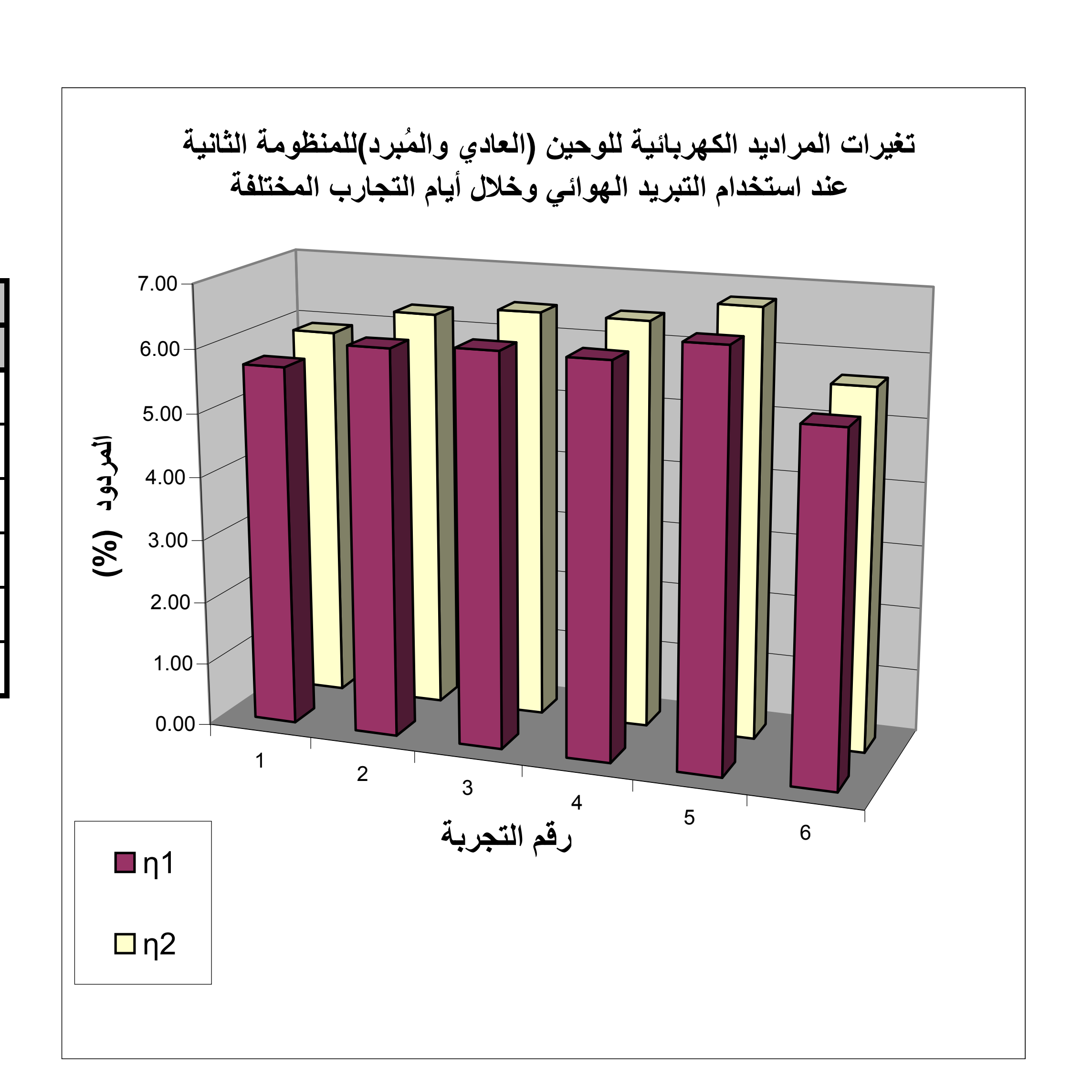
10/10/2010		
الساعة	Ts_1	Ts_2
10	29	29
11	33	31
12	39	34
13	41	36
14	41	35
15	40	34
16	37	33



الجــدول (34-4)

نتائج التبريدالهوائي للمنظومة الثانية خلال أيام التجارب المختلفة

اليوم	η1	η2	Δη
	%	%	%
07/10/2010	5.70	5.92	3.68
08/10/2010	6.11	6.32	3.30
10/10/2010	6.20	6.46	4.16
12/10/2010	6.18	6.44	4.12
24/10/2010	6.51	6.76	3.69
25/10/2010	5.46	5.69	3.95



4-6-2-3 تجارب التبريد المائي والهوائي للمنظومة الثانية:

- **ميدأ العمل** : تضمن هذا النموذج من التجارب استخدام التبريد المائي والهوائي في المنظومة الثانية لسطح اللوح المُراد تبريده، أما اللوح الآخر فيبقى بدون تبريد .

يعتمد مبدأ التبريد في هذه الحالة على وجود دارة التبريد المائي، بإضافة إلى وجود المروحة لدفع الهواء تحت اللوح الفوتوفولتي مباشرة.

يمكن القول بأنّ هذا الأنموذج هو خليط للنموذجين السابقين كما في الشكل (4–10)

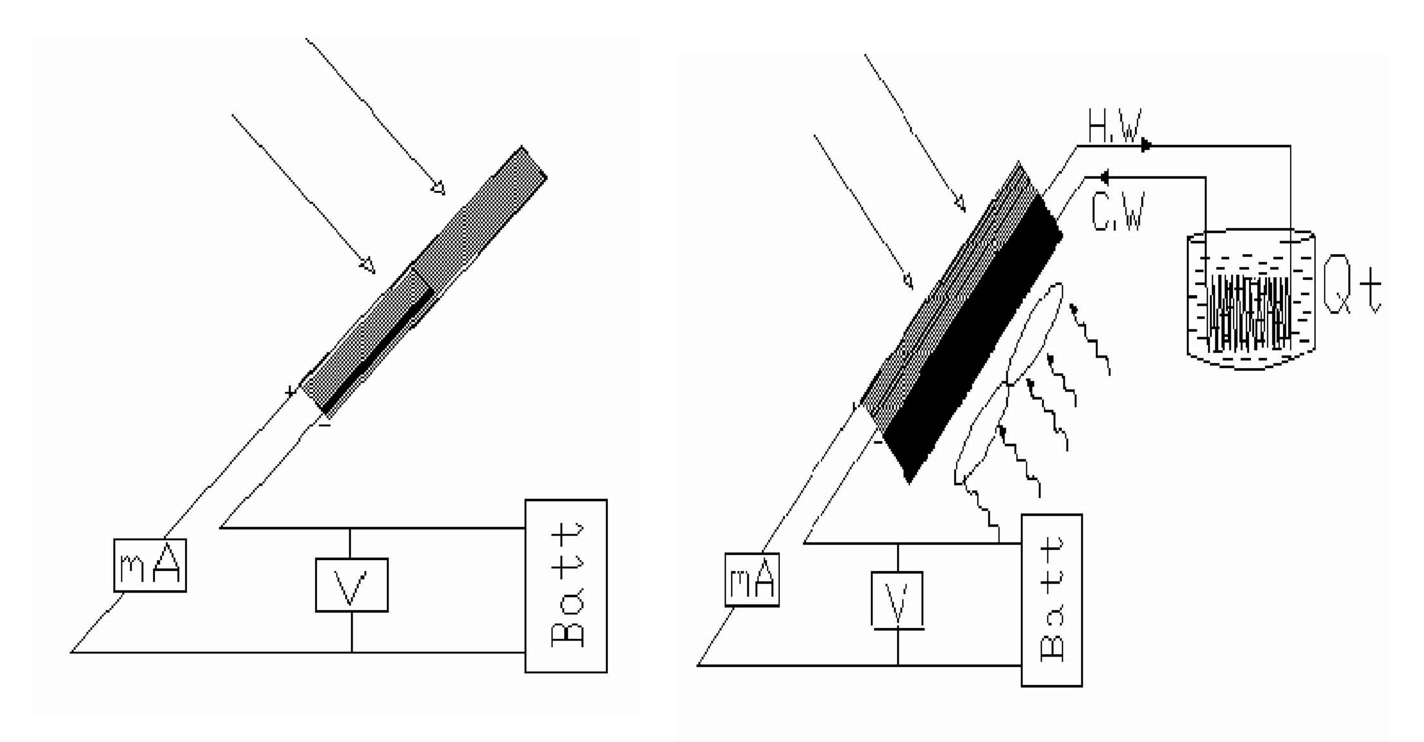


الشكل (4–10) المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي والهوائي معاً.

- **مخطط العمل:**

يبين الشكل (4–11) مخطط العمل للمنظومة الثانية عند استخدام هذا النوع من التبريد، حيث يظهر اللوح المُبرد وتحته مباشرةً المبادل الحراري المُزعنف المتصل مع دارة التبريد المائي وتحت هذا المبادل تمّ وضع المروحة أيضاً.

و يُوصل كل من اللوحين مع جهاز لقياس شدة التيار على التسلسل و جهاز لقياس الجهد ومع بطارية لتخزين الطاقة الكهربائية على التفرع.



اللوح المبرد تبريداً هوائياً ومائياً   اللوح بدون تبريد

الشكل (4−11) مخطط العمل للمنظومة الثانية في حالة التبريد (المائي + الهوائي).

- **منهجية أخذ القياسات على المنظومات الفوتوفولتية المُختبرة:**

قمنا بإجراء مجموعة من التجارب على المنظومة الثانية في حالة التبريد المائي والهوائي وأخذنا القياسات الساعيّة الآتية في كل تجربة وهي: قياسات جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار دارة القصر لــ اللوح الفوتوفولتي (I_{sc}). أما شدة الإشعاع الشمسي فلم يكن بالإمكان قياسها لعدم توفر جهاز قياس شدة الإشعاع الشمسي، بل تم حسابها اعتماداً على طريقة (ASHRAE) (المذكورة في الفصل الأول)، كما قمنا بقياس درجة حرارة الماء في الخزان الحراري.

أما المقادير الساعية المحسوبة بدلالة المقادير السابقة، والتي تُستخدم لتقييم تحسّن أداء المنظومة فهي: الاستطاعة الكهربائية للألواح الكهربائية (P_{MPP}) الممثلة بالعلاقة (4−7)، و المراديد الكهربائية (η) للوحين والممثلة بالعلاقة (4−8)، والزيادة النسبية في المردود الكهربائي لــ اللوح ($\Delta\eta$) المعطاة بالعلاقة (4−9)، إضافةً لكمية الحرارة التي يكتسبها الماء في الخزان الحراري (Q_t) والمعطاة بالعلاقة (4−1).

وحساب المردود الكلي للمنظومة المبردة والمعطى بالعلاقة (4−10).

- **نتائج القياسات والحسابات:**

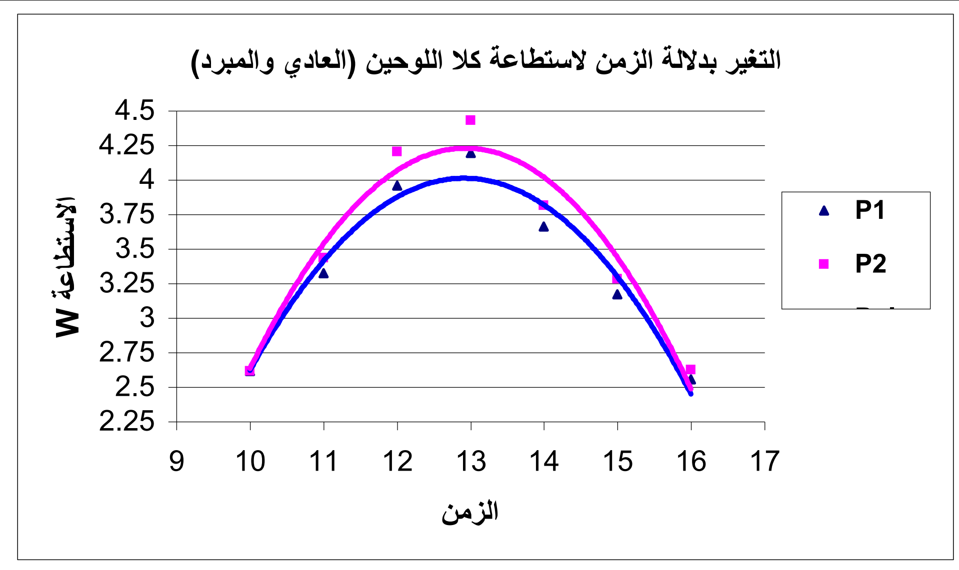
يمكن إجمال القيم الساعيّة المُقاسة والمُحسوبة للتجارب المُنجزة على المنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي والهوائي وخلال أيام مختلفة خلال جداول تُعبر عن :

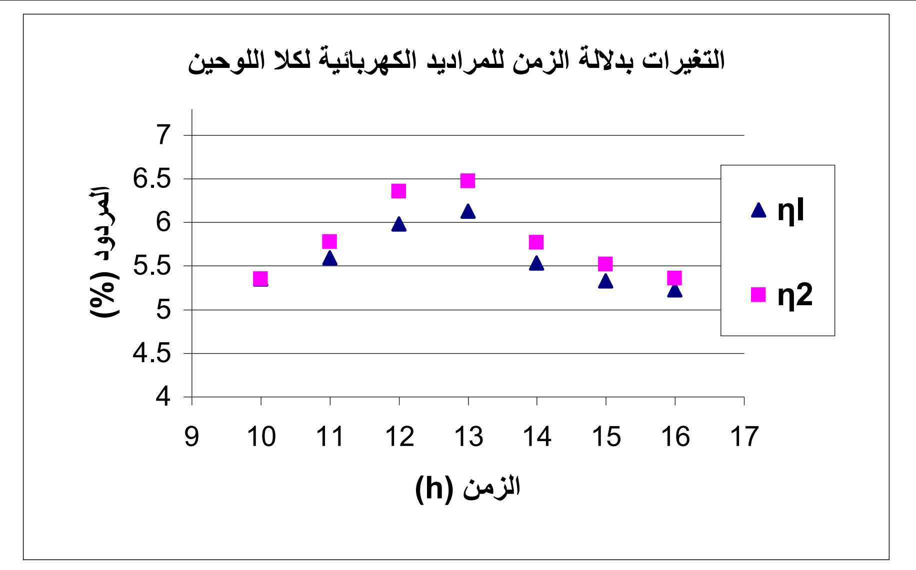
شدة الإشعاع الشمسي(H_t)، ولكل لوح: جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})، وتيار دارة القصر (I_{sc})، و الاستطاعة (P)، والمردود الكهربائي(η)- الرقم 1 يخص اللوح غير المُبــرد ، والــرقم 2 يخـــص اللـــوح المُبـــرد- والتغيرات النسبية في كل من الاستطاعة (ΔP)، والمردود الكهربائي (Δη).

كما تحتوي الجداول على قياسات لدرجات حرارة الماء في الخزان وكمية الحرارة التي يكتسبها المـــاء فـــي الخزان الحراري (ذي المبادل المغمور)من التبريد لسطح اللوح الفوتوفولتي (Q_t). كمـــا تحتـــوي الجـــداول أيضاً على حسابات للمردود الكلي η_{tot} (يأخذ بعين الاعتبار الأثر الكهربـــائي والحـــراري للـــوح المُبـــرد)، بالإضافة إلى التغير النسبي للمردود الكلي $\Delta\eta_{tot}$.

الجدول (35-4) نتائج التبريد المائي والهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 01/07/2011

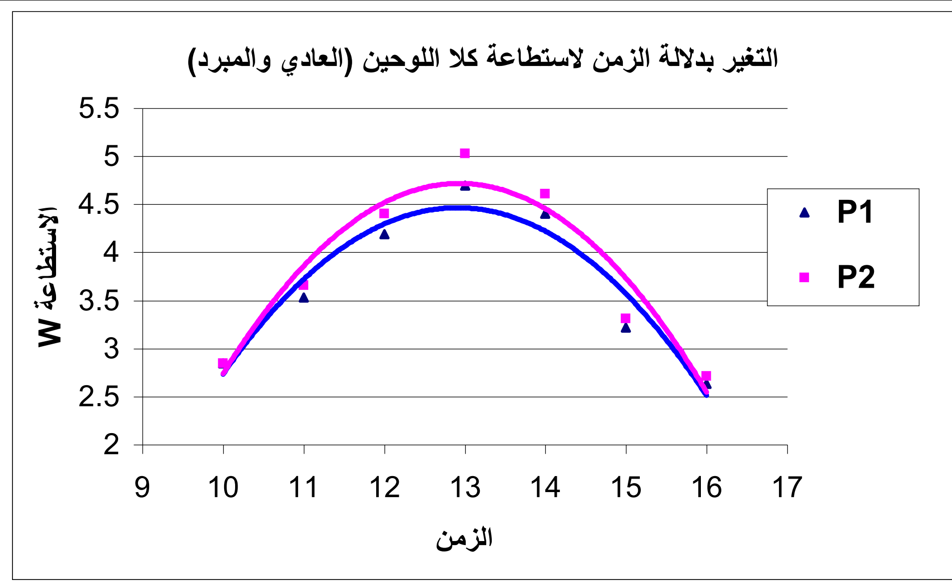
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 عادي (بدون تبريد)				اللوح 2 تبريد مائي وهوائي				$\Delta\eta$	ΔP	درجة حرارة المياه في الخزان °C	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_I	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		k J		
														m.cp.Δt	%	%
10	699.15	48.94	10.1	360	2.62	5.35	10.1	360	2.62	5.35	0.00	0.00	27.00		5.35	0
11	849.77	59.48	10.3	450	3.32	5.59	10.7	446	3.44	5.78	3.25	3.25	27.60	3.77	6.06	7.7
12	945.24	66.17	10.4	530	3.96	5.98	11.1	526	4.20	6.35	5.87	5.87	28.30	4.40	6.65	10.0
13	977.91	68.45	10.5	555	4.20	6.13	11.3	547	4.43	6.47	5.30	5.30	29.20	5.65	6.84	10.4
14	945.24	66.17	10.4	490	3.66	5.53	10.9	486	3.81	5.76	3.99	3.99	29.80	3.77	6.02	8.0
15	849.77	59.48	10.2	430	3.17	5.33	10.7	426	3.28	5.52	3.40	3.40	30.20	2.51	5.70	6.6
16	699.15	48.94	10.1	350	2.56	5.22	10.5	347	2.62	5.36	2.59	2.59	30.50	1.88	5.53	5.6
														21.98		

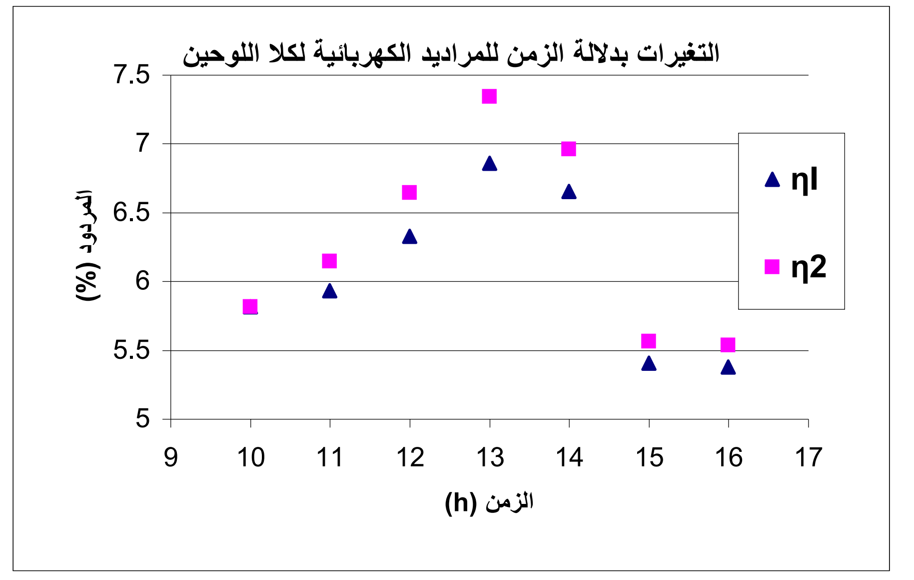




الجدول (36-4) نتائج التبريد المائي والهوائي على المنظومة الثانية لليـــوم: 04/07/2011

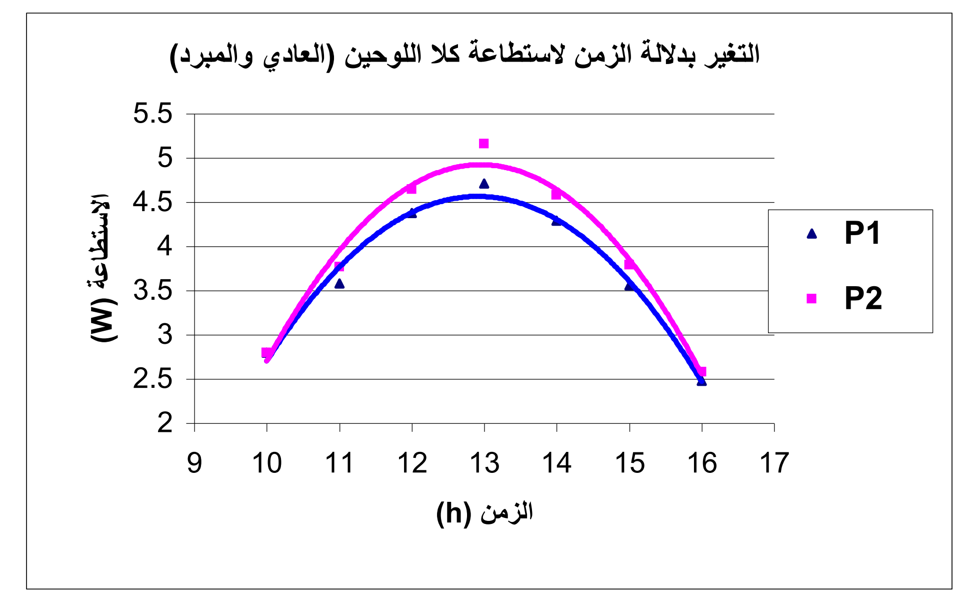
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 عادي (بدون تبريد)				اللوح 2 تبريد مائي وهوائي				$\Delta\eta$	ΔP	درجة حرارة الماء في الخزان °C	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_1	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		k J		
														m.cp.Δt	%	%
10	699.20	48.94	10.4	380	2.85	5.81	10.4	380	2.85	5.81	0.00	0.00	28.00		5.81	0
11	850.13	59.51	10.7	460	3.53	5.93	11.1	457	3.66	6.14	3.42	3.42	28.40	2.51	6.33	6.3
12	945.78	66.20	10.8	540	4.19	6.32	11.4	536	4.40	6.65	4.82	4.82	29.30	5.65	7.02	9.9
13	978.52	68.50	10.9	600	4.70	6.86	11.7	597	5.03	7.34	6.63	6.63	30.30	6.28	7.75	11.5
14	945.78	66.20	10.7	570	4.40	6.65	11.3	566	4.61	6.96	4.44	4.44	31.30	6.28	7.38	9.9
15	850.13	59.51	10.6	420	3.22	5.41	11.0	418	3.31	5.56	2.79	2.79	32.00	4.40	5.89	8.2
16	699.20	48.94	10.4	350	2.63	5.38	10.8	349	2.71	5.54	2.92	2.92	32.20	1.26	5.65	4.9
														26.37		

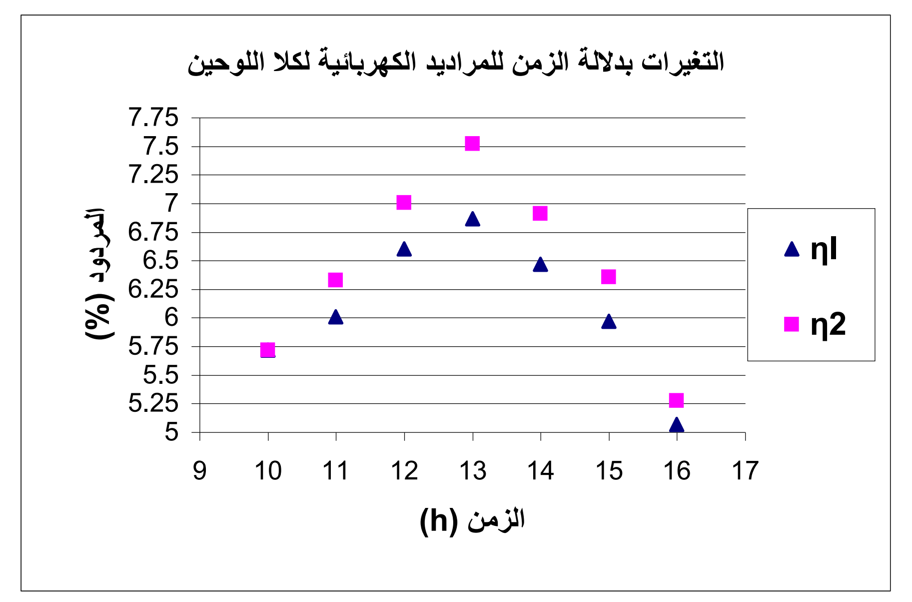




الجدول (4-37) نتائج التبريد المائي والهوائي على المنظومة الثانية لليـــــوم: 10/07/2011

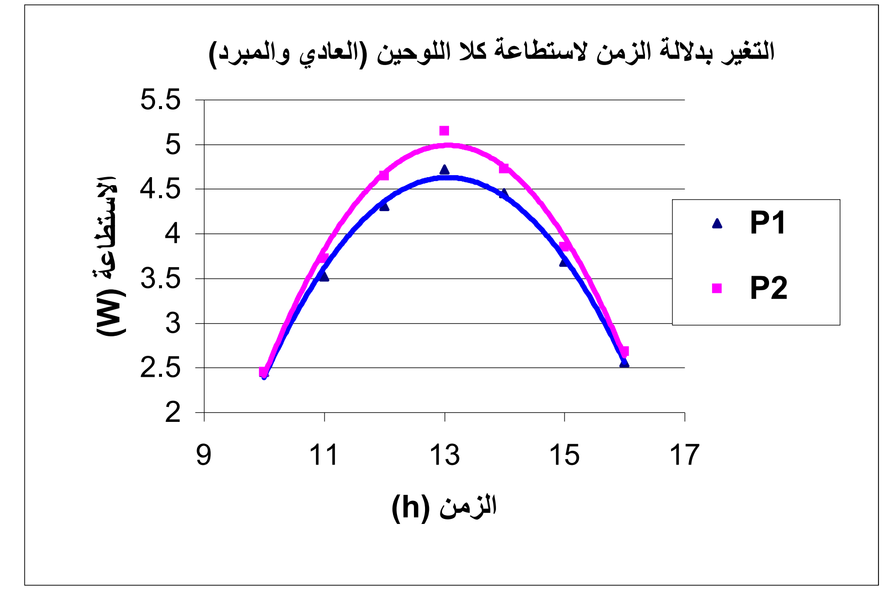
الساعة	الإشعاع الشمسي		عادي (بدون تبريد) اللوح 1				تبريد مائي وهوائي اللوح 2						درجة حرارة الماء في الخزان			
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_I	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2	$\Delta\eta$	ΔP		Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		k J		
														m.cp.Δt	%	%
10	699.27	48.95	10.50	370	2.80	5.71	10.50	370	2.80	5.71	0.00	0.00	25.0		5.71	0
11	851.03	59.57	10.81	460	3.58	6.01	11.46	457	3.77	6.33	5.00	5.00	25.4	2.51	6.51	7.7
12	947.21	66.30	10.86	560	4.38	6.60	11.60	556	4.64	7.00	5.71	5.71	26.3	5.65	7.38	10.5
13	980.12	68.61	10.90	600	4.71	6.86	11.99	597	5.16	7.52	8.71	8.71	27.5	7.53	8.00	14.2
14	947.21	66.30	10.83	550	4.29	6.47	11.65	546	4.58	6.91	6.41	6.41	28.3	5.02	7.25	10.7
15	851.03	59.57	10.74	460	3.56	5.97	11.51	457	3.79	6.36	6.06	6.06	28.8	3.14	6.59	9.4
16	699.27	48.95	10.44	330	2.48	5.07	10.94	328	2.58	5.27	3.91	3.91	29.3	3.14	5.56	8.8
														27.00		

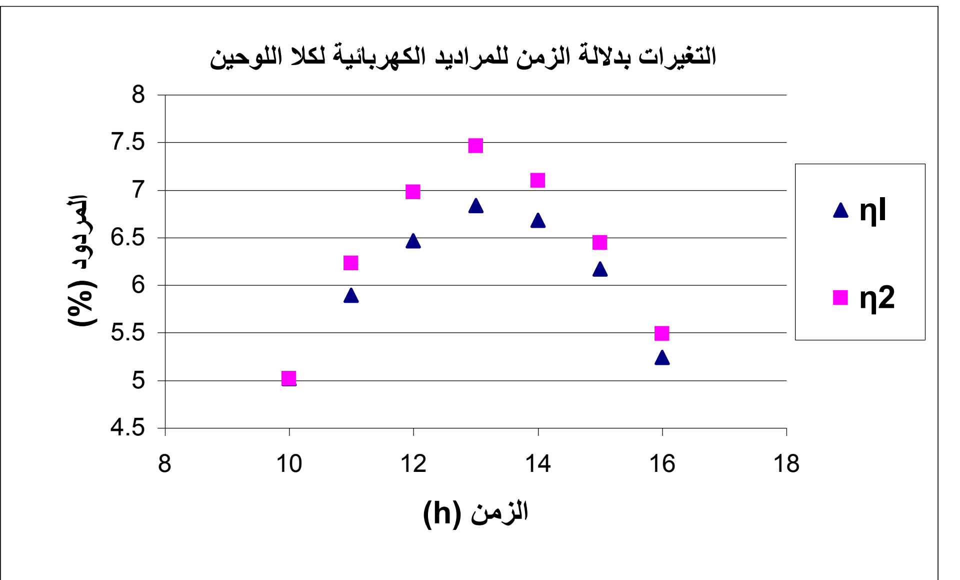




الجدول (38-4) نتائج التبريد المائي والهوائي على المنظومة الثانية لليــــوم: 28/07/2011

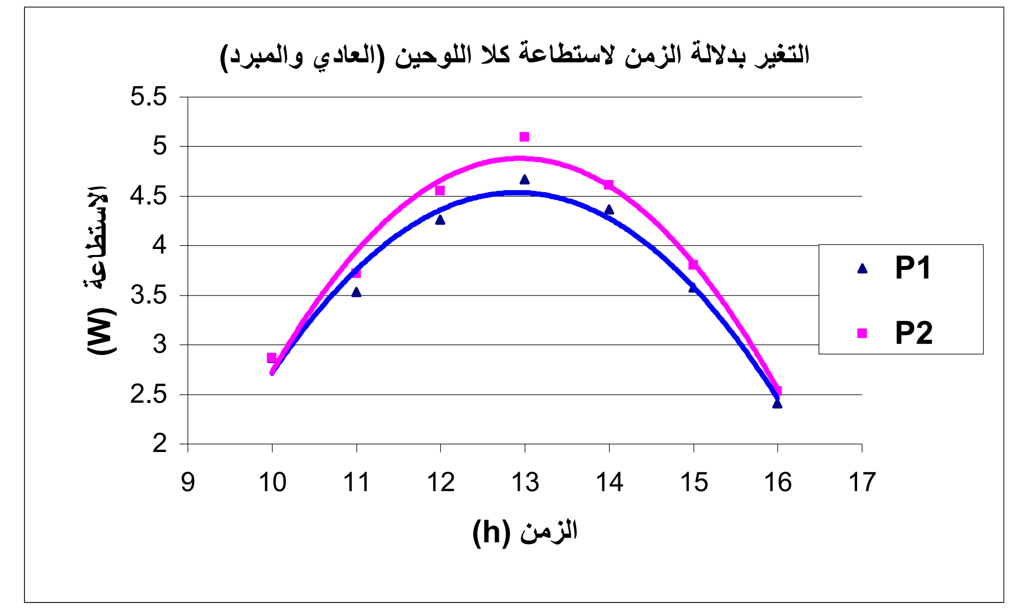
الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 عادي (بدون تبريد)				اللوح 2 تبريد مائي وهوائي				$\Delta\eta$	ΔP	درجة حرارة الماء في الخزان °C	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_I	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2						
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%	%	%		k J		
														m.cp.Δt	%	%
10	698.24	48.88	10.3	330	2.45	5.02	10.3	330	2.45	5.02	0.00	0.00	29.50		5.02	0
11	853.49	59.74	10.6	460	3.52	5.89	11.3	457	3.72	6.23	5.39	5.39	30.10	3.77	6.51	9.4
12	951.83	66.63	10.9	550	4.31	6.47	11.8	547	4.65	6.98	7.34	7.34	30.80	4.40	7.27	11.1
13	985.47	68.98	10.9	600	4.72	6.84	12.0	596	5.15	7.46	8.36	8.36	31.60	5.02	7.78	12.2
14	951.83	66.63	10.9	570	4.45	6.68	11.6	566	4.73	7.10	5.81	5.81	32.50	5.65	7.47	10.5
15	853.49	59.74	10.7	480	3.68	6.17	11.2	477	3.85	6.44	4.28	4.28	33.30	5.02	6.81	9.5
16	698.24	48.88	10.2	350	2.56	5.24	10.7	348	2.68	5.49	4.56	4.56	33.70	2.51	5.72	8.4
														26.37		

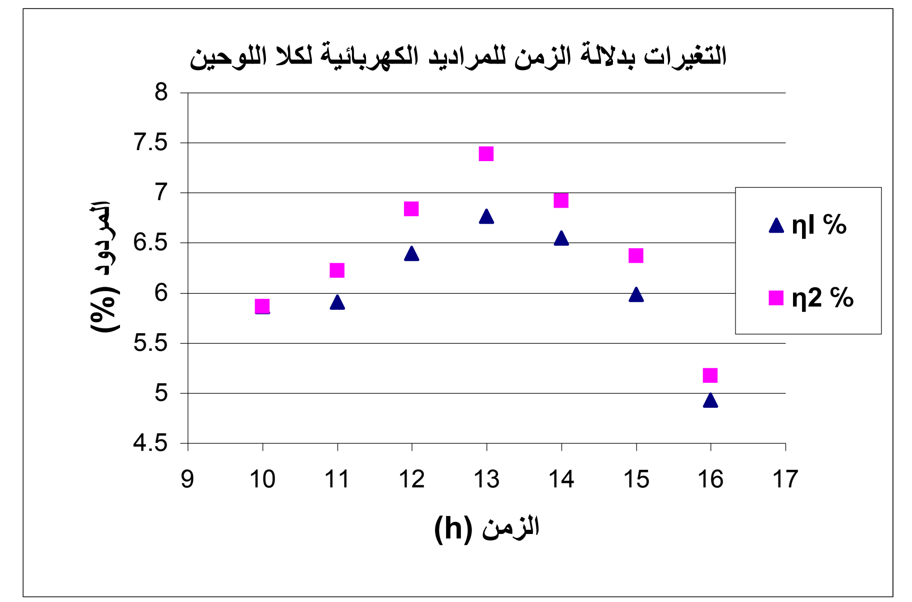




الجدول (39-4) نتائج التبريد المائي والهوائي على المنظومة الثانية لليـــوم: 29/07/2011

الساعة	الإشعاع الشمسي		اللوح 1 عادي (بدون تبريد)				اللوح 2 تبريد مائي وهوائي				$\Delta\eta$	ΔP	درجة حرارة الماء في الخزان°	Q_t	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$
t	H_t	H_t	V_{oc1}	I_{sc1}	P_1	η_I	V_{oc2}	I_{sc2}	P_2	η_2	%	%		k J		
	W/m²	W	V	mA	W	%	V	mA	W	%				m.cp.Δt	%	%
10	698.24	48.88	10.20	390	2.86	5.86	10.20	390	2.86	5.86	0.00	0.00	30.00		5.86	0
11	853.49	59.74	10.66	460	3.53	5.91	11.30	457	3.72	6.22	5.00	5.00	30.50	3.14	6.45	8.4
12	951.83	66.63	10.76	550	4.26	6.40	11.58	546	4.55	6.83	6.41	6.41	31.10	3.77	7.08	9.7
13	985.47	68.98	10.80	600	4.67	6.76	11.88	596	5.10	7.39	8.45	8.45	31.90	5.02	7.71	12.3
14	951.83	66.63	10.63	570	4.36	6.55	11.31	566	4.61	6.92	5.35	5.35	32.60	4.40	7.21	9.2
15	853.49	59.74	10.34	480	3.57	5.98	11.08	477	3.80	6.37	6.06	6.06	33.20	3.77	6.65	10.0
16	698.24	48.88	10.14	330	2.41	4.93	10.71	328	2.53	5.17	4.64	4.64	33.80	3.77	5.51	10.5
														23.86		



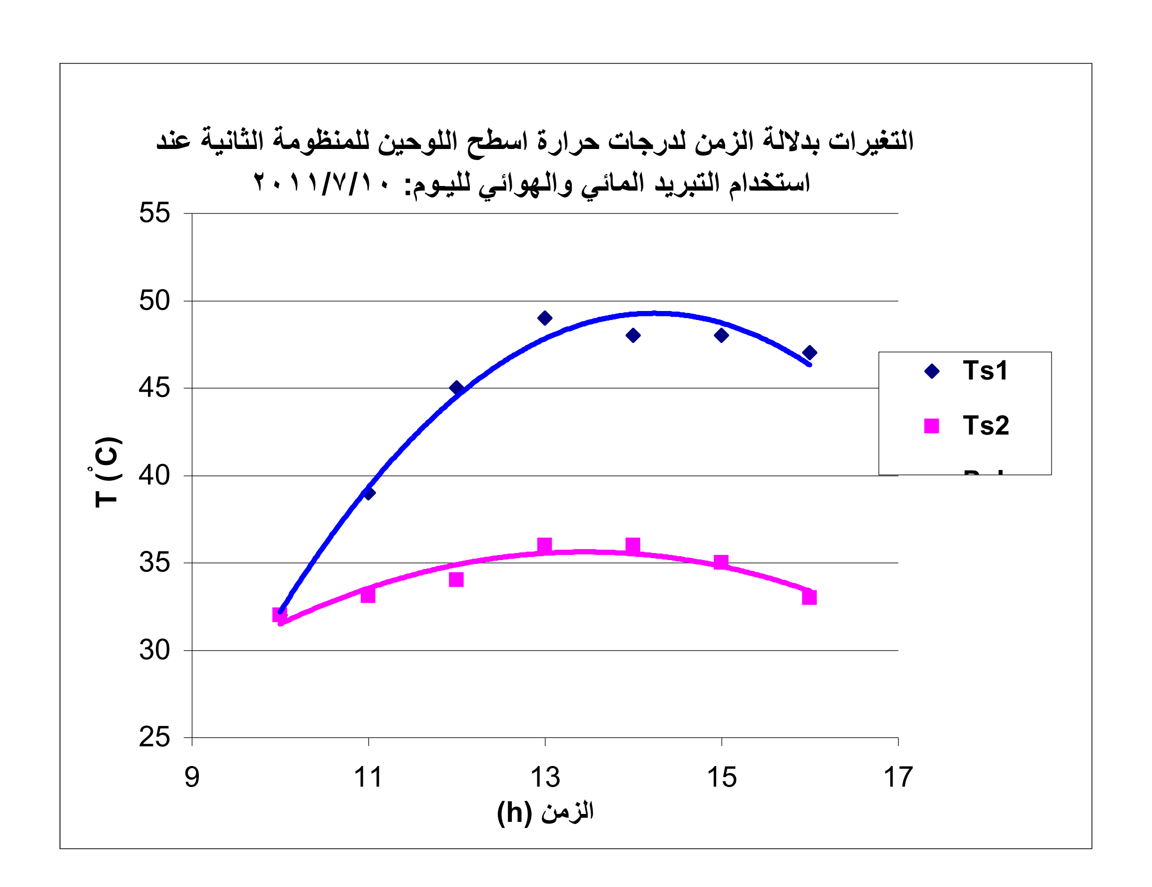


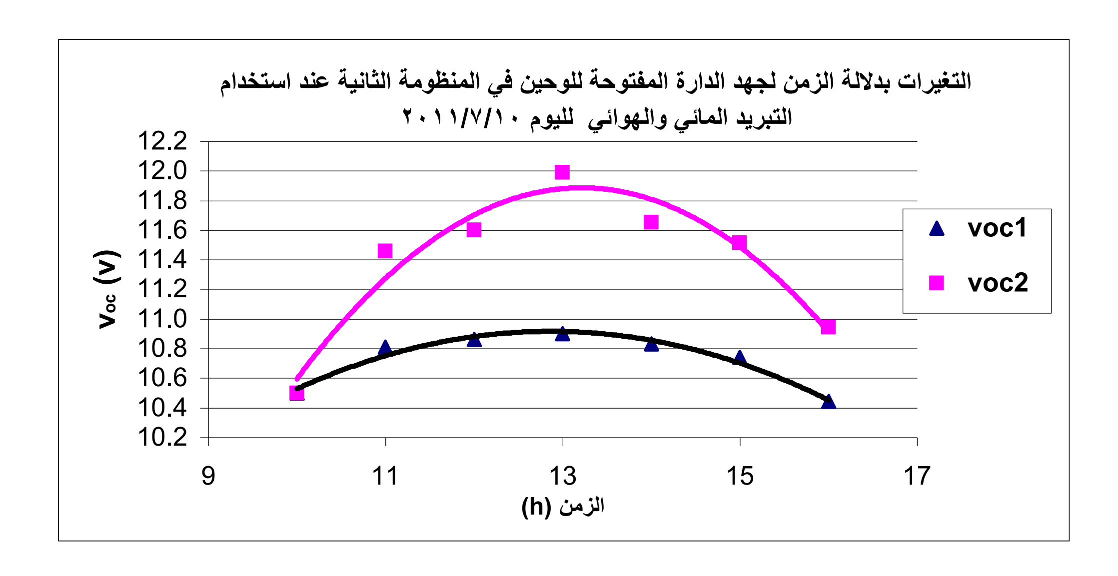
جدول (4-40)

التغيرات بدلالة الزمن لدرجات حرارة أسطح اللوحين (العادي والمُبرد)للمنظومة الثانية عند استخدام التبريد المائي والهوائي لليـــــوم:

10/07/2011

الساعة	T_{s1}	T_{s2}
10	32	32
11	39	33
12	45	34
13	49	36
14	48	36
15	48	35
16	47	33





جدول (4-41) نتائج التبريد المائي والهوائي للمنظومة الثانية خلال أيام التجارب المختلفة

اليوم	η_1	η_2	$\Delta\eta$	ΔP	η_{tot}	Q_t	$\Delta\eta_{tot}$
	%	%	%	%	%	k J	%
01/07/2011	6.13	6.47	5.30	5.30	6.84	21.98	10.36
04/07/2011	6.86	7.34	6.63	6.63	7.75	26.37	11.51
10/07/2011	6.86	7.52	8.71	8.71	8.00	27.00	14.25
28/07/2011	6.84	7.46	8.36	8.36	7.78	26.37	12.15
29/07/2011	6.76	7.39	8.45	8.45	7.71	23.86	12.28

نتائـــج البحـث

توصلنا من خلال التجارب المختلفة والتي اجريناها على المنظومتين الأولى والثانية إلى مـا يأتي:

A– نتائج تجارب المنظومة الأولى(النتائج بالنسبة للوح الذي مساحته (50cm×50cm):

- بلغت أكبر زيادة في كمية الحرارة (ΔQ_e) (المحسوبة من تحول الأثر الكهربائي للوح الفوتوفولتي إلى حراري بوساطة المقاومة الكهربائية المغمورة في الخزان الحراري) نتيجة استخدام التبريد مقداراً 25 kJ .
- بلغت أكبر كمية حرارة مسحوبة من اللوح (Q_t)نتيجة تبريده 42.82 kJ حيث يمكن استثمار هذه الحرارة في تطبيقات مختلفة كتسخين الماء في تجاربنا.
- بلغت أكبر زيادة نسبية في المردود الكهربائي للوح الفوتوفولتي ($\Delta\eta$) نتيجة تبريده تبريداً مائياً مقداراً وقدره 42.5% .
- بلغت أكبر زيادة نسبية في المردود الإجمالي ($\Delta\eta_{tot}$)(يأخذ بالحسبان الأثر الكهربائي والحراري للوح) 66.23 %.

B- نتائج تجارب المنظومة الثانية/التبريد المائي باستخدام مبادل مزعنف/(النتائج بالنسبة للوح الذي مساحته (40cm×25cm):

- أمكن التوصل إلى زيادة نسبية في استطاعة اللوح (**ΔP**) و في المردود الكهربائي (Δη) نتيجة تبريده تبريداً مائياً 8.43% .
- بلغت أكبر كمية حرارة متولدة من الحرارة المسحوبة من اللوح المبرد (Q_t) نتيجة تبريده تبريداً مائياً 57.14 k J حيث يمكن استثمار هذه الحرارة في تطبيقات أخرى.
- بلغت أكبر زيادة نسبية في المردود الإجمالي ($\Delta\eta_{tot}$)مقداراً وقدره (48.77 %.)

C- نتائج تجارب المنظومة الثانية/عند استخدام التبريد الهوائي (النتائج بالنسبة للوح الذي مساحته (40cm×25cm):

- بلغت أكبر زيادة نسبية في الاستطاعة (**ΔP**) و في المردود (Δη) 4.16%.

D- نتائج التجربة الرابعة/التبريد الهوائي+المائي/(النتائج بالنسبة للوح الذي مساحته (40cm×25cm):

- أمكن التوصل إلى زيادة نسبية في استطاعة اللوح(**ΔP**) و في المردود (**$\Delta\eta$**) نتيجة تبريده تبريداً مائياً وهوائياً 8.71% .
- بلغت أكبر كمية حرارة متولدة من الحرارة المسحوبة من اللوح المبرد (Q_t) نتيجة تبريده تبريداً مائياً وهوائياً 27 kJ حيث يمكن استثمار هذه الحرارة في تطبيقات أخرى.
- بلغت أكبر زيادة نسبية في المردود الإجمالي ($\Delta\eta_{tot}$) نتيجة تبريده تبريداً مائياً وهوائياً مقداراً وقدره 14.25%

كما يمكن تلخيص هذه النتائج في جداول كما يأتي:

نتائج المنظومة الأولى (50 cm X50 cm)					
ΔQ_e	Q_t	$\Delta\eta$	η_{tot}	$\Delta\eta_{tot}$	
k J	k J	%	%	%	
25	42.82	42.5	7.7	66.23	

تائج المنظومة الثانية (40 cmX25 cm)

تبريد مائي فقط		تبريد هوائي فقط		تبريد مائي +هوائي	
$\Delta\eta_e$ %	8.43	$\Delta\eta_e$ %	4.16	$\Delta\eta_e$ %	8.71
ΔP %	8.43	ΔP %	4.16	ΔP %	8.71
Q_t k J	57.14			Q_t k J	27
η_{tot} %	12.23			η_{tot} %	8
$\Delta\eta_{tot}$ %	48.77			$\Delta\eta_{tot}$ %	14.25

التوصـــــيات و المُقترحـــات

بعد عرض نتائج هذا البحث فإننا نوصي بما يأتي:

1. ضرورة استمرارية البحث نظراً لأهميته المزدوجة في تحسين مردود الخلايا الفوتوفولتية من جهة، ومن جهة أخرى في إمكانية استثمار الحرارة المسحوبة من الألواح المُبردة في تطبيقات مفيدة كتسخين الماء مثلاً. كما يمكن التفكير بتقنيات تبريد أخرى يمكن لها ان تحقق زيادة اكبر في المردود ويمكن أن تؤدي إلى استثمار أكبر لكميات الحرارة المسحوبة نتيجة التبريد.
2. التركيز على الحصول على أكبر طاقة كهربائية ممكنة من المنظومات نفسها بالإضافة إلى طاقة حرارية .
3. التركيز على إحداث تماس حراري جيد ما بين الألواح الفوتوفولتية المُراد تبريدها وبين الجزء من دارة النبريد المُتوضع تحت هذه الألواح وهذا يستدعي التفكير بدارات تبريد أكثر تعقيداً من الدارة المُستخدمة في تجاربنا.
4. الدعم المادي والمعنوي وتنشيط حركة البحث في مجالات الطاقة الشمسية.
5. القيام بإنشاء بنك لمعلومات الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة وشدة الرياح وكمية الغبار وغيرها من المعلومات الدورية الضرورية لاستخدامات الطاقة الشمسية .
6. القيام بمشاريع رائدة وكبيرة نوعاً ما وعلى مستوى يفيد البلد كمصدر آخر من الطاقة وتدريب الكوادر العربية عليها بالإضافة إلي عدم تكرارها بل تنويعها في البلدان العربية للاستفادة من جميع تطبيقات الطاقة الشمسية .
7. تنشيط طرق التبادل العلمي والمشورة العلمية بين البلدان العربية وذلك عن طريق عقد الندوات واللقاءات الدورية .
8. تطبيق جميع سبل ترشيد الحفاظ على الطاقة .
9. تشجــيع التعاون مع الـــــــدول المتقدمـــــة في هــذا المجال والاستفـــــادة من خبراتهــــا على أن يكــون ذلك مبنيــــاً على أســــاس المنفعة المتبادلة.


ملحق A

شدة الإشعاع الشمسي لأيام إجراء التجارب المحسوب من جداول ASHRAE [W/m^2]

23/06/2011	22/06/2011	21/06/2011	20/06/2011	19/06/2011	18/06/2011	17/06/2011	16/06/2011	15/06/2011	الساعة/اليوم
701.2409212	701.23787	701.23726	701.23909	701.24335	701.24995	701.25879	701.26974	701.2826	10
851.8943165	851.87974	851.87682	851.88557	851.90596	851.93791	851.98128	852.0359	852.10155	11
947.3774859	947.35571	947.35136	947.36443	947.39488	947.44264	947.50754	947.5894	947.68796	12
980.0542179	980.03	980.02516	980.03969	980.07357	980.12669	980.1989	980.29001	980.39975	13
947.3774859	947.35571	947.35136	947.36443	947.39488	947.44264	947.50754	947.5894	947.68796	14
851.8943165	851.87974	851.87682	851.88557	851.90596	851.93791	851.98128	852.0359	852.10155	15
701.2409212	701.23787	701.23726	701.23909	701.24335	701.24995	701.25879	701.26974	701.2826	16

04/07/2011	01/07/2011	30/06/2011	29/06/2011	28/06/2011	27/06/2011	26/06/2011	25/06/2011	24/06/2011	الساعة/اليوم
699.1993733	699.14841	701.32162	701.305	701.28968	701.27594	701.26401	701.2541	701.24636	10
850.1286453	849.77296	852.31204	852.2201	852.13843	852.06736	852.0072	851.95818	851.9205	11
945.7827686	945.23719	948.00536	947.86646	947.74341	947.63661	947.54636	947.47295	947.41661	12
978.5172917	977.90726	980.75344	980.5986	980.46151	980.34257	980.24211	980.16042	980.09773	13
945.7827686	945.23719	948.00536	947.86646	947.74341	947.63661	947.54636	947.47295	947.41661	14
850.1286453	849.77296	852.31204	852.2201	852.13843	852.06736	852.0072	851.95818	851.9205	15
699.1993733	699.14841	701.32162	701.305	701.28968	701.27594	701.26401	701.2541	701.24636	16

				26/07/2011	21/07/2011	19/07/2011	17/07/2011	10/07/2011	الساعة/اليوم
				698.23716	698.8736	699.02914	699.13934	699.26644	10
				853.49028	852.86897	852.55983	852.22989	851.032	11
				951.82939	950.42913	949.83173	949.22853	947.20688	12
				985.47389	983.80993	983.11488	982.41909	980.11811	13
				951.82939	950.42913	949.83173	949.22853	947.20688	14
				853.49028	852.86897	852.55983	852.22989	851.032	15
				698.23716	698.8736	699.02914	699.13934	699.26644	16

شدة الإشعاع الشمسي لأيام إجراء التجارب المحسوب من جداول ASHRAE [W/m^2]

	25/10/2010	21/10/2010	12/10/2010	10/10/2010	08/10/2010	07/10/2010	03/10/2010	01/10/2010	الساعة/اليوم
	824.13253	835.57667	859.49414	864.35999	869.03394	871.2954	879.80807	869.03394	**10**
	945.76756	957.15045	980.85291	985.64949	990.2442	992.46201	1000.7707	990.2442	**11**
	987.07381	998.47051	1022.1689	1026.9555	1031.5363	1033.7455	1042.233	1031.5363	**12**
	945.76756	957.15045	980.85291	985.64949	990.2442	992.46201	1000.7707	990.2442	**13**
	824.13253	835.57667	859.49414	864.35999	869.03394	871.2954	879.80807	869.03394	**14**
	628.35266	640.35027	665.50328	670.65301	675.61791	678.02802	687.16118	675.61791	**15**
	365.46624	379.85863	409.79194	415.90808	421.8116	424.68168	435.60271	421.8116	**16**

18/09/2009	06/09/2009	02/09/2009	25/10/2010	24/10/2010	12/10/2010	10/10/2010	08/10/2010	07/10/2010	الساعة/اليوم
878.96	875.50	873.24	824.13	827.03	859.49	878.55	869.03	871.30	**10**
991.32	985.48	982.39	945.77	948.65	980.85	999.68	990.24	992.46	**11**
1029.75	1023.12	1019.75	987.07	989.96	1022.17	1031.54	1031.54	1033.75	**12**
991.32	985.48	982.39	945.77	948.65	980.85	999.68	990.24	992.46	**13**
878.96	875.50	873.24	824.13	827.03	859.49	878.55	869.03	871.30	**14**
701.50	702.02	701.12	628.35	631.39	665.50	684.90	675.62	678.03	**15**
474.14	480.33	481.30	365.47	369.12	409.79	429.60	421.81	424.68	**16**

	21/10/2010	12/10/2010	10/10/2009	25/09/2009	15/09/2009	24/09/2009	22/09/2009	20/09/2009	الساعة/اليوم
	835.58	859.49	864.36	857.89	870.81	878.26	878.70	878.93	**10**
	957.15	980.85	985.65	974.24	986.06	991.69	991.78	991.66	**11**
	998.47	1022.17	1026.96	1013.94	1025.42	1030.47	1030.45	1030.21	**12**
	957.15	980.85	985.65	974.24	986.06	991.69	991.78	991.66	**13**
	835.58	859.49	864.36	857.89	870.81	878.26	878.70	878.93	**14**
	640.35	665.50	670.65	673.03	688.21	698.94	699.98	700.83	**15**
	379.86	409.79	415.91	433.13	452.69	468.80	470.76	472.54	**16**

المراجع العلمية العربية والأجنبية

[1]-MED.CSP.Multi-Effect Destination Plant /Mediterranean Region, Cocentrating Solar Power, 2005.

[2] –د.م. دنده رضوان، بنية العناصر الالكترونية وخواصها، 1995–1996 .

[3]–د. قدوره نجاح، الطاقة لشمسية سلاح المستقل، دمشق 1995.

[4]-Duffie.JohnA.and Beackman.WilliamA, Solar Engineering of Thermal Processes,1991

[5]-James& James, Planning and installing photovoltaic System, ltd in USA and UK , 2005.

[6] حلقة عمل حول مجالات استخدام الطاقة الشمسية في التنمية الريفية الخرطوم 1995.

[7] جريدة الوطن، المملكة العربية السعودية، العدد الصادر بتاريخ **2001/6/11.**

[8]-ASHREA, Handbook of Fundamental, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta,w.S.A.1981.

[9]-Iqbal,M.An Introduction to Solar Radiation .Ontaria,Academic Press Canada 1993.

[10]- A.A.M.SAYIGH,Solar Energy Engineering ,Acdemic Press , New York San Fracisco , London ,1977.

[11]- LOF,G.O.F.,DUFFIE,F.A and SMITH ,C.O.,World Distribution of Solar Radiation ,university of Wisconsin Report No21,1966.

[12] د.م. المحمد موسى، الدكتور المهندس جورج رامي، كتاب محطــات تحويــل الطاقــة، جامعة تشرين 2005–2006.

[13]-Tomas Markvart , Solar Electricity ,university of Southampton ,UK,1994.

[14]– د.م. المصري رضوان، مبادئ الطاقة الشمسية الحرارية وتطبيقاتها".

[15]-M.Ibrahim, Performance Anlysis And Sizing Of Integrated Renewable Energy System ,14th European Photovoltic Solar Conference,spain ,2000.

[16]-William T.M.Boha,and Price.H, Solar Thermal Electric Hybridization lssues ,March-1995.

[17]-Fred Christopher,Treble,Generating Electricity From The Sun.

[18] – د.م. شريتح إحسان، أسس الهندسة الالكترونية، 1994–1995.

[19]- Lorenzo, E., G. Araujo, A. Cuervas, M. Egido, J. Minano, and R. Zilles,1994 . Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems , pp.340.

[20]- Hadj Arab, A., F. Chenlo, K. Mukadam, and J. L. Balenzategui, 1999.Performance of PV water pumping systems, Renewable Energy, v. 18,no. 2, p.191.

[21]- Harsono, H., S. Tokuda, and S. Rahardjo, 2003. Evaluation of performance of photovoltaic system with maximum power point (MPP), Solar energy materials & solar cells, Elsevier, pp 673-678.

[22]- Takeshi Yamaguchi, Nobuyuki Tobe, Daisuke Matsumoto, Takuma Nagai, Hironori Arakawa, Highly efficient plastic-substrate dye-sensitized solar cells with validated conversion efficiency of 7.6% ,Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) 812–81.

[23] -Takahiro Mishima n, MikioTaguchi,HitoshiSakata,EijiMaruyama , Development status of high-efficiency HIT solar cells ,Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 18–21.

[24]-HayoungPark, SoonwooKwon, JoonSungLee, HeeJinLim ,SewangYoon, DonghwanKim"Improvement on surface texturing of single crystalline silicon for solar cells by saw-damage etching using an acidic solution.

[25] -J. Zhoa, Member,IEEE,A.Wang,E.Abbaspour-sani,and Martin A.Green,Fellow,IEEE, Improve Efficiency Silicon Solar Cell Module, IEEE ELECTRONDEVICE LETTERS ,VOL.18,N0.2,FEBUARY 1997.

[26]-M.K. EL –Adaw, I. A. AL-Nuaim the Temperature functional dependence of VOC for a solar cell in relation to its efficiency .

[27]-Germ_a Garcia-Belmonte , Temperature dependence of open-circuit voltage in organic solar cells from generation–recombination kinetic balance.

[28]-E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations.

[29]- M. Abdolzadeh, M. Ameri, Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells,2009.

[30]-B.J.HUANG,T.H.LIN,W.C. and F.S.SUN ,Performance Evaluation Of Solar Photovoltic/Thermal Systems, National Taiwan University,Taipei 106,Taiwan,Vol70,no.5,pp.443-448,2001.

[31] د. موسى علي، المناخ والأرصاد الجوية ، إصدار جامعة دمشق **1991**.

ABSTRACT:

In This research, the efficiency of solar photovoltaic system was studied, using heat exchanger unit, with water current and thermo storage, controlled with a small water pump. This arrangement gave us an increase of photovoltaic energy conversion, as electrical, in addition to heat energy. This led to the increase of the overall efficiency of the same system, when not using cooling in the system.

Beside, when using a small electric fan in parallel with water, as, heat exchanger, we calculate an additional increase of the overall efficiency of the system .

Key Word:

Solar energy , photovoltaic conversion, efficiency.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education
Tishreen University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Department of the Mechanical forces Engineering



Improving performance of conversion efficiency of solar-energy to electrical for a photovoltaic system

Prepared by

Eng. Israa Ans Leila

Supervised by

Supervisor
Dr. Lana. H. Kenjo

Associated Supervisor
Prof. Dr. Fouad saleh

2010-2011